

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE CASAS DE GESSO NO BRASIL

PAULO ROBERTO FREIRE DE PAULA

Tese submetida para obtenção do grau de
DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professor Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas

Co-orientador: Doutor João Manuel do Paço Quesado Delgado

JANEIRO DE 2017

PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Programa Doutoral em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Suba o primeiro degrau com fé. Você não tem que ver toda a escada.

Você só precisa dar o primeiro passo.

Martin Luther King J

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta etapa deste trabalho de Doutorado, quero expressar os mais sinceros agradecimentos ao apoio recebido nesta fase, não podendo deixar de destacar as pessoas que vêm desempenhando papéis de fundamental importância para o êxito deste:

- Ao Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas pela total dedicação e entusiasmo no desenvolvimento científico do trabalho, apoiando tanto no intelectual, como no pessoal;
- Ao Doutor João Delgado, pelas constantes contribuições e apoio no transcurso do presente trabalho;
- A Deus, na escuta silenciosa dos meus apelos;
- À minha família.

RESUMO

Desde o início da civilização humana temos utilizado diferentes estratégias com o objetivo de construir casas saudáveis, confortáveis e econômicas. Nos últimos anos, as condições higrotérmicas interiores dos edifícios tem sido extensivamente estudadas e parametrizadas.

Neste trabalho é apresentado um sistema construtivo modular simples baseado em blocos de gesso. Argumenta-se que este sistema construtivo reduz consideravelmente a mão-de-obra, o tempo de execução e os custos finais da construção. Isto é particularmente importante num país cujo objetivo é alcançar 3 milhões de novas moradias num curto espaço de tempo. No entanto, a avaliação da durabilidade das soluções deve ser analisada, bem como a execução e desempenho nos diversos climas do Brasil.

O desempenho higrotérmico da casa de gesso foi avaliada por modelagem avançada, usando o software WUFIPlus. Os resultados numéricos obtidos permitem uma discussão sobre o conforto interior e consumo de energia.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi importante uma análise do déficit habitacional no Brasil, de forma a perspectivar o futuro. A análise expõe uma clara necessidade de construção de novas habitações no país. De preferência devem ser escolhidos soluções construtivas, simples, rápidas e fáceis de implementar, sem descuidar o conforto e durabilidade. A utilização dos recursos naturais endógenos locais tais como o gesso, pode ser uma solução interessante tanto do ponto de vista ambiental, como econômico. Assim, um sistema construtivo modular inovador baseado em blocos de gesso é apresentado e monitorizado com o objetivo de validar o programa de simulação avançado utilizado.

O Brasil é um país muito extenso, com clima muito diferente por região, pelo que se efetuou um estudo exaustivo dos dados climáticos do país e das estratégias construtivas adotadas pelas normas NBR15220-3 e NBR 15575 em cada zona bioclimática, para assegurar as condições mínimas de conforto.

Refletiu-se sobre o conforto térmico e ventilação noturna em casas de gesso do Brasil, tendo por base o modelo adaptativo descrito nas normas ASHRAE 55 e ISO 7730 para a avaliação do conforto térmico.

A campanha experimental para medições do desempenho higrotérmico de casas de gesso do Brasil visou medir as principais variáveis físicas que permitem caracterizar as condições no interior, e simultaneamente validar o programa de cálculo no estudo de sensibilidade.

Desenvolveu-se um amplo estudo de simulação para avaliar a influência das características da envolvente (cobertura, paredes e fator solar de vãos envidraçados), bem como a influência da ventilação.

Finalmente, para quatro cidades brasileiras, com climas diversos, quantificou-se o consumo de energia e o desconforto passivo para vários cenários estudados, que permitem fundamentar as vantagens inerentes da casa de gesso.

PALAVRAS-CHAVE: Casa de Gesso, Simulação Numérica, Desempenho Higrotérmico, Estudo de sensibilidade, Índice de desconforto.

ABSTRACT

Since the beginning of human civilization, we have used different strategies in order to build healthy, comfortable and economical houses. In recent years, the hygrothermal conditions of building's interior has been widely studied and parameterized.

In this study it is presented a simple modular constructive system based in plaster blocks. It is argued that this building system considerably reduces hand labor, execution time and the final cost of construction. This is particularly important in a country whose goal is to reach 3 million new homes in a short time. However, the evaluation of the durability of the solutions should be analyzed as well as the implementation and performance in various climates Brazil.

The hygrothermal performance of the plaster house was assessed by advanced modeling using WUFIPlus software. The numerical results obtained allowed a discussion on the indoor comfort and energy consumption.

For the development of this study, it was important an analysis of the housing deficit in Brazil, in order to look to the world. The analysis indicates a clear need for new housing construction in the country. Preferably should be chosen constructive solutions, simple, fast and easy to implement, without neglecting the comfort and durability. The use of local endogenous natural resources such as plaster, can be an attractive solution from an environmental point of view as well as economical. Thus, an innovative modular building system based on plaster blocks is displayed and monitored in order to validate the advanced simulation program used.

Brazil is a very large country with very different climates throughout its regions, so it was made a comprehensive study of the country's climate data and constructive strategies were adopted by standards NBR15220-3 and NBR 15575 in each bioclimatic zone to ensure the minimum conditions comfort.

It has been reflected on the thermal comfort and night time ventilation in plaster houses of Brazil, based on the adaptive model described in ASHRAE 55 and ISO 7730 standards for the evaluation of thermal comfort.

The experimental campaign for hygrothermal performance measurements of plaster houses in Brazil aimed to measure the main physical variables that can characterize the building's interior conditions and at the same time validate the calculation program in the sensitivity study.

It has been developed a comprehensive simulation study to evaluate the influence of environment characteristics (coverage, walls and solar factor of glazed areas), as well as the influence of ventilation.

Finally, it was quantified the energy consumption and discomfort for four Brazilian cities, with different climates, for several scenarios studied, which substantiate the intervening advantages of plaster house.

KEYWORDS: Gypsum house, Numerical simulation, Hygrothermal Performance, Sensitive study, Discomfort Index.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1.INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	2
1.3. ESTRUTURA DA TESE	4
 2.DÉFICIT HABITACIONAL BRASILEIRO E EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO TÉRMICO.....	 7
2.1. PROBLEMÁTICA DO DÉFICIT HABITACIONAL BRASILEIRO.....	7
2.1.1. PATRIMÔNIO EDIFICADO BRASILEIRO	7
2.1.2. DÉFICIT HABITACIONAL QUANTITATIVO E QUALITATIVO NO BRASIL	8
2.1.3. POLÍTICA NACIONAL DE HABITAÇÃO APÓS 2003	11
2.1.4. PROJEÇÃO DA DEMANDA HABITACIONAL DE 2007 A 2023 E PERSPECTIVAS FUTURAS DA QUESTÃO HABITACIONAL.....	12
2.1.5. ESTATÍSTICA DOS PADRÕES HABITACIONAIS BRASILEIRO.....	15
2.1.6. PROMOÇÃO DE CASAS OFERTADAS PELO PODER PÚBLICO.....	16
2.2. A QUESTÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA	17
2.2.1. USO DE ENERGIA NO BRASIL E NO MUNDO	17
2.2.2. CONSUMOS ESPECÍFICOS SETORIZADOS	18
2.2.3. SINTESE.....	20
2.3. ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO	20
2.3.1. SINTESE.....	30
2.4. NÍVEIS NORMATIVOS DE DESEMPENHO TÉRMICO NO BRASIL	31
2.4.1. ABNT NBR 15.220 (2005) – DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	31
2.4.2. ABNT NBR 15.575 (2013) - EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - DESEMPENHO	31
2.4.3. RTQ-R (2012) – REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES E MULTIFAMILIARES	32
2.4.4. CONSIDERAÇÕES QUANTO À ABERTURA PARA VENTILAÇÃO VS. ÁREA DO PISO (%)	33
2.4.5. CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS LIMITES INDICADORES DE DESEMPENHO TÉRMICO DA ENVOLVENTE PARA A NBR 15220-3 E NBR 15575-5	34

2.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	36
--	-----------

3.CONFORTO TÉRMICO E VENTILAÇÃO NOTURNA

3.1. ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO	37
3.1.1. HISTÓRICO DE ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO.....	37
3.1.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	38
3.1.3. FANGER (PMV/PPD)	38
3.1.4. ABORDAGEM ADAPTATIVA.....	39
3.1.5. QUANTIFICAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO.....	40
3.1.6. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO – ASHRAE 55.....	41
3.1.7. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO DA EN 15251.....	42
3.1.8. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO PORTUGUÊS – LNEC.....	44
3.1.9. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADOTADO.....	45
3.2. VENTILAÇÃO NOTURNA	46
3.2.1. VENTILAÇÃO NATURAL COMO AGENTE DE CONTROLE DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR.....	46
3.2.2. VENTILAÇÃO NOTURNA COMO AGENTE NO ARREFECIMENTO DAS EDIFICAÇÕES	47
3.2.3. CONTRIBUTOS INTERNACIONAIS NO ÂMBITO DA VENTILAÇÃO NOTURNA.....	47
3.2.4. SÍNTESE	49

4.IMPORTÂNCIA DA PRODUÇÃO GESSEIRA NO BRASIL E CASAS DE GESSO

4.1. HISTÓRICO DE CONSTRUÇÕES EM GESSO NO BRASIL	51
4.2. IMPORTÂNCIA DA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA PRODUÇÃO GESSEIRA NO BRASIL	54
4.3. IMPORTÂNCIA DA CONSTRUÇÃO EM GESSO NO NORDESTE DO BRASIL	55
4.4. ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO EM GESSO.....	56
4.5. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONSTRUÇÕES EM GESSO NO NORDESTE BRASILEIRO.....	58
4.6. HISTÓRICO INTERNACIONAL DE CONSTRUÇÕES EM GESSO	58
4.7. NORMATIZAÇÃO INTERNACIONAL SOBRE GESSO.....	59
4.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO	60

5.CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA CASA DE GESSO-TIPO EM SERVIÇO

5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA	61
---	-----------

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO TIPO EM ESTUDO.....	61
5.2.1. LOCALIZAÇÃO DA CASA DE GESSO	61
5.2.2. ASPECTOS FISIográficos DE PETROLINA	63
5.2.3. CARACTERIZAÇÃO E GEOMETRIA DA CASA DE GESSO	63
5.2.4. IMPLANTAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO	67
5.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	69
5.3.1. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR - INVERNO	69
5.3.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR – VERÃO.....	73
5.4. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	76
5.4.1. MODELO ADAPTATIVO – ASHRAE 55	76
5.4.2. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO – ESTAÇÃO INVERNO	76
5.4.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO – ESTAÇÃO VERÃO.....	77
5.5. SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	78
 6.VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZADO.....	 79
6.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	79
6.2. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO SELECIONADO.....	79
6.2.1. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO WUFIPLUS	81
6.3. MODELAÇÃO GEOMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO-TIPO	83
6.3.1. DADOS CLIMÁTICOS EXTERIORES.....	85
6.3.2. PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS INSERIDOS NO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO WUFIPLUS	87
6.3.3. GANHOS INTERNOS DE CALOR POR OCUPAÇÃO, EQUIPAMENTOS E ILUMINAÇÃO.....	89
6.3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE UTILIZAÇÃO.....	91
6.3.5. DEFINIÇÕES DE CONDIÇÕES INICIAIS DE SIMULAÇÃO	92
6.3.6. DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO E VENTILAÇÃO	92
6.4. VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICO	93
6.4.1. TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR INTERIOR – INVERNO	94
6.4.2. TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR INTERIOR – VERÃO	96
6.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98

7. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO TÉRMICO, ENERGÉTICO E DO CONFORTO DE CASAS DE GESSO	101
7.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA	101
7.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	103
7.2.1. ÁRVORE DE SIMULAÇÃO	103
7.2.2. CENÁRIOS OBTIDOS NA ÁRVORE	104
7.2.3. INFLUÊNCIA DO CLIMA.....	106
7.2.4. PARÂMETROS CONSIDERADOS NO ESTUDO.....	108
7.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO, DO CONFORTO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO VERÃO	110
7.3.1. PETROLINA	110
7.3.2. SÃO PAULO	116
7.3.3. CURITIBA.....	121
7.3.4. RECIFE.....	126
7.3.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE VERÃO	131
7.4. CONSUMO ENERGÉTICO NA ESTAÇÃO DE VERÃO-ARREFECIMENTO	135
7.4.1. PETROLINA	135
7.4.2. SÃO PAULO	137
7.4.3. CURITIBA.....	139
7.4.4. RECIFE.....	140
7.4.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO CONSUMO ENERGÉTICO.....	142
7.5. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO (IDTP –V)- VERÃO	145
7.5.1. IDTP-V PARA PETROLINA-PE	145
7.5.2. IDTP-V PARA SÃO PAULO-SP.....	147
7.5.3. IDTP-V PARA CURITIBA-PR	148
7.5.4. IDTP-V PARA RECIFE-PE	148
7.5.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO DE VERÃO – IDTP-V	149
7.6. CONSUMO ENERGÉTICO PARA ARREFECIMENTO NA ESTAÇÃO DE INVERNO	152
7.6.1. PETROLINA	152
7.6.2. SÃO PAULO	153
7.6.3. CURITIBA.....	155

7.6.4. RECIFE	157
7.6.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO CONSUMO ENERGÉTICO DE ARREFECIMENTO	159
7.7. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO (IDTP-I)- INVERNO	162
7.7.1. IDTP-I PARA PETROLINA	162
7.7.2. IDTP-I PARA SÃO PAULO.....	162
7.7.3. IDTP-I PARA CURITIBA	163
7.7.4. IDTP-I PARA RECIFE	164
7.7.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO DE INVERNO – IDTP-I	165
 8.CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DA CASA DE GESSO EM FUNÇÃO DO CLIMA NO BRASIL.....	 167
8.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA	167
8.2. CONDIÇÕES DE CONFORTO PARA VÁRIAS REGIÕES CLIMÁTICAS	167
8.3. MODELO DE QUANTIFICAÇÃO DAS CLASSES DE DESCONFORTO PASSIVO DE VERÃO	168
8.4. ADEQUABILIDADE DA CASA DE GESSO AO CLIMA.....	169
8.5. RECOMENDAÇÕES SOBRE A IMPLANTAÇÃO DE CASAS DE GESSO NO BRASIL	173
8.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	173
 9.CONCLUSÕES.....	 175
9.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS.....	175
9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	177
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Organograma da Política Nacional de Habitação [3].....	11
Fig. 2 - Mapeamento da Demanda por Tipologia no Brasil [8]	13
Fig. 3 - Distribuição de Aglomerados Subnormais no Brasil [4].....	15
Fig. 4 - Subsídios Para a Política Habitacional (adaptado de FGV)	16
Fig. 5 - Crescimento demográfico VS. Aumento do consumo energético-Período 1990 a 2010 [4]	17
Fig. 6 - Consumo Percentual Setorizado de Energia Elétrica-Brasil [17]	18
Fig. 7 – Matriz Energética Interna do Brasil por Setor [19]	19
Fig. 8 - Mapa de Divisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro [43].....	21
Fig. 9 - Variação de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Curitiba [110].....	22
Fig. 10 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Curitiba	22
Fig. 11 - Variação de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Passo Fundo [110]	23
Fig. 12 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Passo Fundo	23
Fig. 13 - Variação de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de São Paulo [110]	24
Fig. 14 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de São Paulo	24
Fig. 15 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Brasília [110].....	25
Fig. 16 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para Brasília	25
Fig. 17 – Variação da temperatura e umidade relativa para a cidade de Niterói [110].....	26
Fig. 18 - Curva de probabilidade acumulada da temperatura do ar para Niterói.....	26
Fig. 19 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Bom Jesus da Lapa [110].....	27
Fig. 20 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Bom Jesus da Lapa.....	27
Fig. 21 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Petrolina [110]	28
Fig. 22 - Probabilidade Acumulada Para Petrolina	28
Fig. 23 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Recife [110]	29
Fig. 24 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Recife	29
Fig. 25 - Curvas de probabilidade acumulada para 7 zonas bioclimáticas no Brasil.....	30
Fig. 26 - Zona de conforto térmico segundo a ASHRAE 55 [63]	40
Fig. 27 - Método Adaptativo ASHRAE 55: Zona de Conforto para Edifícios Naturalmente Ventilados [80].....	41
Fig. 28 - Diagrama de conforto térmico da EN 15251[64]	43
Fig. 29 - Valores recomendados da temperatura de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (adaptado de [53]).....	44
Fig. 30 - Correlação entre os valores médios das temperaturas do ar e operativa (adaptado de [53])	45
Fig. 31 - Influência do incremento da velocidade do ar na temperatura de conforto (adaptado [78]) ..	47
Fig. 32 - Edifício de Múltiplos Pavimentos Construído em Gesso: Petrolina-PE.....	52
Fig. 33 - Edifício de Apartamentos construído em Gesso: Belém do São Francisco- PE	52
Fig. 34 - Casa de Gesso em Construção em Gravatá-PE	53

Fig. 35 - Edifício com paredes internas em blocos de gesso: Fortaleza. Fonte (Google)	53
Fig. 36 - Edifício com paredes internas e externas em blocos de gesso: Rio de Janeiro. Fonte:(Google).....	54
Fig. 37 - Localização geográfica da região do Araripe [22].....	54
Fig. 38 – Protótipo construído em gesso no ITEP com 8 anos (Fonte:ITEP,2015)	58
Fig. 39 - Localização do Protótipo no sítio urbano	62
Fig. 40 - Localização geográfica da área de estudo (Fonte: Google maps).	62
Fig. 41 - Planta com localização de janelas, portas e sensores instalados (piso 0)	64
Fig. 42 – Visualização dos alçados Noroeste e Nordeste da casa de gesso.	65
Fig. 43 – Fachada Noroeste da edificação e vista interior da parede Noroeste	65
Fig. 44 – Envidraçado característico e fachada SW da edificação	65
Fig. 45 - Detalhes interiores da casa de gesso – área de circulação	66
Fig. 46 - Sensor Externo e Cozinha	67
Fig. 47 - Sensor na Área de Circulação e conjunto router + ponto de acesso.	68
Fig. 48 - Identificação das Zonas Térmicas no Protótipo	68
Fig. 49 - Sensor Wireless WLS 05 [137]	69
Fig. 50 - Registros da temperatura interior da casa de gesso no inverno em regime de livre flutuação	70
Fig. 51 - Temperatura média mensal do ar interior na estação de Inverno	70
Fig. 52 - Distribuição da temperatura do ar interior do protótipo durante a estação do inverno	71
Fig. 53 - Curva de distribuição acumulada da temperatura do ar interior no inverno em livre flutuação	72
Fig. 54 - Registros da temperatura do ar interior e exterior durante a estação do verão em flutuação livre	73
Fig. 55 - Temperatura Interior média mensal no verão	74
Fig. 56 - Distribuição da temperatura do ar interior do protótipo no Verão	74
Fig. 57 - Curva de distribuição acumulada da temperatura do ar interior no verão	75
Fig. 58 - Conforto Térmico à luz da ASHRAE 55 para o protótipo no Inverno.....	76
Fig. 59 - Conforto Térmico à luz da ASHRAE 55 para o protótipo no Verão	77
Fig. 60 - Esquema do processo de cálculo do WUFI Plus [adaptado de 96].	82
Fig. 61 - Output do Programa WUFIPlus relativo a duas zonas térmicas simuladas	82
Fig. 62 - Planta piso “0” da casa de gesso-tipo com detalhes dos cômodos.....	83
Fig. 63 - Modelação da casa de gesso no WUFI-Plus	84
Fig. 64 - Desvãos “grande” e “pequeno” fortemente ventilados.....	84
Fig. 65 - Dados meteorológicos estação do INMET em Petrolina-PE	85
Fig. 66 - Temperatura e umidade relativa do ar exterior no período de 17 a 21/09/2015 na estação de inverno	85
Fig. 67 - Velocidade do vento para o período de validação do edifício-tipo na estação de inverno.....	86

Fig. 68 - Temperatura e umidade relativa do ar exterior no período de 18 a 23/03/2015 na estação de verão.....	86
Fig. 69 - Velocidade do Vento para o período de validação do edifício-tipo na estação de verão.....	87
Fig. 70 - Fluxograma de dados para modelos de simulação higrotérmica (adaptado de [84])	88
Fig. 71 - Curvas das propriedades do gesso após introdução no WUFIPlus [96]	88
Fig. 72 - Propriedade dos elementos envidraçados introduzidos no WUFIPlus [96].....	89
Fig. 73 - Contabilização de ganhos Internos de Iluminação e Equipamentos	90
Fig. 74 - Perfil de contabilização da ventilação noturna no WUFI Plus	91
Fig. 75 - Perfil de ocupação na contabilização dos ganhos internos.....	91
Fig. 76 - Perfil de definição de um sistema de arrefecimento modelado no WUFIPlus.....	92
Fig. 77 Comparação entre valores medidos e numéricos-Z1-sala estar- Inverno- período de 01/06 a 31/07/2015.....	94
Fig. 78 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Inverno- período 01 a 19/06/2015 ...	95
Fig. 79 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Inverno entre os dias 1 e 6 de Junho de 2015.....	95
Fig. 80 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Inverno entre os dias 15 e 19 de Junho de 2015.....	96
Fig. 81 - Comparação entre valores da umidade relativa do ar medida experimentalmente e simulado – Inverno – “Sala Estar” no período de 01/06 a 19/06/2015	96
Fig. 82 - Comparação entre valores medidos e simulados para “Sala de Estar” – Verão no período de 01/01 a 15/05/2015	97
Fig. 83 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Verão no período de 24/01 a 30/01/2015.....	97
Fig. 84 - Comparação entre Valores de umidade relativa do ar – Verão- “Sala Estar”	98
Fig. 85 - Esquema em árvore para estudo de sensibilidade.....	104
Fig. 86 - Localização das cidades estudadas no Brasil	106
Fig. 87 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média diária exterior para Petrolina - 2015	107
Fig. 88 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média diária exterior para Recife - 2015	107
Fig. 89 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média exterior para São Paulo – 2015.....	107
Fig. 90 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média exterior para Curitiba – 2015.....	108
Fig. 91- Variação da temperatura do ar interior para os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” em São Paulo	109
Fig. 92 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade de Petrolina.	111
Fig. 93 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para Petrolina.	112
Fig. 94 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura do ar interior de verão para Petrolina.	114
Fig. 95 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico de paredes no verão para Petrolina.	115

Fig. 96 - Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura interior, no verão, para Petrolina.....	115
Fig. 97 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade São Paulo.....	116
Fig. 98 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para os cenários críticos estudados em São Paulo.....	118
Fig. 99 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura do ar interior de verão para São Paulo.	119
Fig. 100 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico de paredes no verão para São Paulo.....	120
Fig. 101 - Influência do fator solar de envidraçados na temperatura do ar interior no verão para São Paulo.....	121
Fig. 102 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade de Curitiba.....	121
Fig. 103 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para os cenários críticos estudados em Curitiba.	123
Fig. 104 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura interior de verão para Curitiba.	124
Fig. 105 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Curitiba.	125
Fig. 106 - Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura do ar no verão para Curitiba.	126
Fig. 107 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade de Recife.....	126
Fig. 108 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para os cenários críticos estudados em Recife	128
Fig. 109 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura interior de verão para Recife	129
Fig. 110 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Recife.	130
Fig. 111 - Influência do fator solar dos envidraçados e das paredes na temperatura interior de verão para Recife.	131
Fig. 112 - Percentagem de tempo de desconforto térmico no verão dos cenários críticos estudados para as 4 cidades	132
Fig. 113 - Temperatura média do ar interior no verão dos cenários críticos estudados para as 4 cidades.....	133
Fig. 114 - Temperatura do ar interior no verão correspondente ao percentil 95% ($T_{95\%}$)	133
Fig. 115 - Consumo energético para arrefecimento na estação do verão para Petrolina	135
Fig. 116 - Custo de Energia de arrefecimento mensal, no verão, para Petrolina	136

Fig. 117 - Consumo energético para arrefecimento na estação do verão para São Paulo.....	137
Fig. 118 - Custo de energia de arrefecimento no verão para São Paulo	138
Fig. 119 - Consumo energético de arrefecimento na estação de verão para Curitiba.	139
Fig. 120 - Custos de energia de arrefecimento no verão para Curitiba.	140
Fig. 121 - Consumo energético de arrefecimento na estação de verão para Recife.	141
Fig. 122 - Custos de arrefecimento mensal, no verão, para Recife.....	141
Fig. 123 - Consumo energético de arrefecimento no verão para as 4 cidades estudadas.	143
Fig. 124 - Consumo energético de arrefecimento por m ² , na estação de verão, para as 4 cidades estudadas.	143
Fig. 125 - Representação gráfica do consumo energético de arrefecimento total por m ² , da estação de verão, para as quatro cidades estudadas.	144
Fig. 126 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para Petrolina.....	146
Fig. 127 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para São Paulo.	147
Fig. 128 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para Curitiba.	148
Fig. 129 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para Recife.....	149
Fig. 130 - Indicador de Desconforto Térmico Passivo de verão para as quatro cidades estudadas.	150
Fig. 131 - Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico Passivo – IDTP-V, para as quatro cidades estudadas	151
Fig. 132 - Consumo energético de arrefecimento na estação de inverno para Petrolina.....	152
Fig. 133 - Custo de Energia mensal para arrefecimento no inverno para Petrolina.....	153
Fig. 134 - Consumo energético para arrefecimento na estação de inverno para São Paulo.....	154
Fig. 135 - Custo de energia de arrefecimento mensal para São Paulo	155
Fig. 136 - Consumo energético para arrefecimento na estação de inverno para Curitiba	156
Fig. 137 - Custos de energia para arrefecimento no inverno em Curitiba.	157
Fig. 138 - Consumo energético na estação do inverno em Recife	158
Fig. 139 - Custos de arrefecimento mensal, no inverno, para Recife	158
Fig. 140 - Consumo energético para arrefecimento, no inverno, para as 4 cidades estudadas.	160
Fig. 141 - Consumo energético para arrefecimento por m ² , na estação de inverno, para as 4 cidades estudadas.	160
Fig. 142 - Representação gráfica do consumo energético de arrefecimento total por m ² , na estação de inverno, para as quatro cidades estudadas.	161
Fig. 143 - Indicador de desconforto térmico de inverno (IDTP-I) para São Paulo	163
Fig. 144 - Indicador de desconforto térmico de inverno (IDTP-I) para Curitiba	164
Fig. 145 - Indicador de Desconforto Térmico Passivo de inverno para as quatro cidades estudadas.....	165
Fig. 146 - Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico Passivo – IDTP-I, para as quatro cidades estudadas.	166
Fig. 147 - Escala de conforto da ASHRAE adaptada	168

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - População e distribuição Relativa (%) para o Brasil e Grandes Regiões [4].....	8
Tabela 2 - Estimativa do Déficit Habitacional Brasileiro [2]	9
Tabela 3 - Déficit Habitacional por Renda Familiar [6]	10
Tabela 4 - Tipologia dos Municípios urbanos e Região Metropolitana na classificação da demanda [8]	12
Tabela 5 - Projeção Habitacional Futura Para Quatro Quadriênios 2007-2023 [8]	14
Tabela 6 - Cenário das Necessidades Habitacionais Totais (2007-2023) Brasil (em milhões de unidades).....	14
Tabela 7 - Critérios de avaliação do desempenho térmico de inverno e verão (adaptado de NBR 15575)	32
Tabela 8 - Percentuais limites de abertura para ventilação [42] e [44].....	33
Tabela 9 - Indicadores de desempenho térmico da envolvente [42] e [45]	35
Tabela 10 - Cronologia de Estudos Nacionais e Internacionais de Conforto Térmico	37
Tabela 11 - Classe de conforto prescrito pela norma [110]	39
Tabela 12 - Condições ambientais no modelo adaptativo	39
Tabela 13 - Contributos Internacionais Sobre Uso da Ventilação Noturna (adaptado de [70]).....	48
Tabela 14 - Consumo “ <i>Per capita</i> ” de gesso mundial (2005) [22]	55
Tabela 15 - Comparativo financeiro e percentual: alvenaria de gesso VS. alvenaria de tijolos [26]	56
Tabela 16 - Dados Comparativos em função da estimativa energética Incorporada [29]	57
Tabela 17 - Normas Internacionais sobre Gesso e Bloco de Gesso	60
Tabela 18 - Aspectos fisiográficos de Petrolina. (Adaptado de IBGE-2010)	63
Tabela 19 - Dimensionamento interior dos cômodos do protótipo	63
Tabela 20 - Detalhamento do Material Construtivo da Casa de Gesso no Brasil	64
Tabela 21 - Caracterização de materiais e componentes construtivos da casa protótipo	66
Tabela 22 - Localização Física dos Sensores de Medição de Temperatura e Umidade	67
Tabela 23 - Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior na estação de inverno em flutuação livre	72
Tabela 24 - Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior na estação do verão em flutuação livre	75
Tabela 25 - Desconforto à luz da ASHRAE 55 para o protótipo casa de gesso- Inverno	77
Tabela 26 - Desconforto à luz da ASHRAE 55 para o protótipo casa de gesso- Verão.....	78
Tabela 27 - Ferramentas de simulação - adaptado de [84],[95],[103].	80
Tabela 28 - Propriedades dos Blocos de Gesso Utilizados na Simulação com WUFIPlus.....	89
Tabela 29 - Valores de Ganhos de calor por ocupação/tipo considerados na simulação no programa WUFIPlus	90
Tabela 30 - Condições iniciais das simulações	92

Tabela 31 - Premissas consideradas no processo de validação do modelo	93
Tabela 32 - Procedimento metodológico de avaliação da influência dos parâmetros no estudo de sensibilidade.	102
Tabela 33 - Cenários obtidos para o estudo de sensibilidade	104
Tabela 34 - Cidades adotadas nas simulações de avaliação do desempenho térmico da casa de gesso	106
Tabela 35 - Valores máximos, médios e mínimos diários de temperatura e umidade do ar para as 4 cidades estudadas.....	108
Tabela 36 - Cenários críticos considerados para o estudo de sensibilidade e valores adotados	109
Tabela 37 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários estudados para a cidade de Petrolina.	112
Tabela 38 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários estudados em Petrolina.	113
Tabela 39 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários estudados para a cidade de São Paulo.....	117
Tabela 40 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários críticos estudados para São Paulo.....	118
Tabela 41 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários críticos estudados para a cidade de Curitiba.	122
Tabela 42 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários estudados em Curitiba	123
Tabela 43 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários críticos estudados para a cidade de Recife.....	127
Tabela 44 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários estudados em Recife	128
Tabela 45 - Representação dos parâmetros avaliados para as 4 cidades em estudo	134
Tabela 46 - Custos totais de energia de arrefecimento no verão para Petrolina.....	136
Tabela 47 - Custos totais de energia, no verão, para São Paulo.	138
Tabela 48 - Custos totais de energia de arrefecimento, no verão, para Curitiba.....	140
Tabela 49 - Custos totais de energia de arrefecimento, no verão, para Recife.....	142
Tabela 50 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para Petrolina.....	146
Tabela 51 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para São Paulo.	147
Tabela 52 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para Curitiba.	148
Tabela 53 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para Recife.....	149
Tabela 54 - Valores de IDTP-V globais para as quatro cidades em estudo.	150
Tabela 55 - Custos totais de energia para arrefecimento no inverno para Petrolina.....	153
Tabela 56 - Custos totais de energia, no inverno, para São Paulo.....	155
Tabela 57 - Custos totais de energia para arrefecimento, no inverno, para Curitiba	157
Tabela 58 - Custos totais de energia, no inverno, para Recife.	159
Tabela 59 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para Petrolina	162
Tabela 60 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para São Paulo.....	163
Tabela 61 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para Curitiba.	164

Tabela 62 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para Recife	165
Tabela 63 - Valores de IDTP-I [°Ch] globais para as quatro cidades em estudo.	165
Tabela 64 - Escala de classe passiva do IDTP global [°Ch]	169
Tabela 65 – IDTP-V da casa de gesso para Petrolina e São Paulo para uma temperatura de conforto de 25°C	169
Tabela 66 – IDTP-V da casa da gesso para Curitiba e Recife para uma temperatura de conforto de 25°C	171
Tabela 67 - Análise de classe de desconforto passivo em função da temperatura operativa em cada cidade	172

SÍMBOLOS, ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AENOR - Associação Espanhola de Normalização e Certificação

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers

ATEDY - Asociación Técnica Y Empresarial Del Yeso

CE - Comunidade Européia

CEDEPLAR - Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional

CEF - Caixa Econômica Federal

CEN - Comitê Europeu de Normalização

Clo - Unidade de Isolamento Térmico para Vestimentas

CONDEPE/FIDEM - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco

CTN - Comissão Técnica de Normalização

DNPM/PE - Departamento Nacional de Produção Mineral-Secção Pernambuco

DRY - Design Reference Year

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A

EMLURB - Empresa de Limpeza Urbana do Recife

ENERGY PLUS - Programa de Simulação Norte Americano

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPW - Energy Plus Weather

EUA - Estados Unidos da América

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

FJP - Fundação João Pinheiro

FUPAM - Fundação para Pesquisa em Arquitetura e Ambiente

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

ISO- International Organization for Standardization

ITEP – Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco

LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

LFC - Laboratório de Física das Construções

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MC - Ministério das Cidades

MERCOSUL - Mercado Comum do Cone Sul

NBR - Norma Brasileira

NF - Norma Francesa

PAC - Programa de aceleração do Crescimento

PLANHAB - Plano Nacional de Habitação

PMCMV - Projeto Minha Casa Minha Vida

PMV - Predicted Mean Vote

PNAD - Pesquisa Nacional de Amostra Domiciliar

PNH - Política Nacional de Habitação

PPD - Predicted Percentage Dissatisfied

PROCEL - Programa de Controle de Desperdício de Energia Elétrica

PRODEC - Programa Doutoral em Engenharia Civil

RTQ - Regulamento Técnico da Qualidade

SINDUSGESSO - Sindicato das Indústrias de Gesso do Estado de Pernambuco

SNH - Sistema Nacional de Habitação

Tconf - Temperatura de Conforto

Tmp - Temperatura Média Ponderada

TMY - Typical Meteorological Year

TRY - Test Reference Year

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

UNE-EN - Normas Espanholas

UNIVASF- Universidade Federal do Vale do São Francisco

WYEC - Weather Year for Energy Calculation

ZB1...ZB8 - Zonas Bioclimáticas 1 a 8

Z - Zona Térmica de Simulação

λ - Condutividade Térmica do Material [W/m.°C]

ρ - Massa Volúmica do Material [kg/m³]

U - Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m².°C]

ϕ - Atraso Térmico [h]

e - espessura do Material

c - calor específico do material

R_t - Resistência Térmica Superficial

CT - Capacidade Térmica de Componente

F_{st=g}[⊥] - fator solar [%]

α - Absortância à Radiação Solar

Rse - Resistência Superficial Externa

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O Brasil é um país de dimensões continentais, com 14,5 milhões de km², com uma população que já ultrapassa os 190 milhões de habitantes, segundo dados estatísticos do último censo realizado em 2010 pelo IBGE [4]. A construção de casas de gesso surgida há pouco mais de uma década no Brasil, vem despertando de forma crescente o interesse em seu estudo por pesquisadores ligados aos diversos ramos da engenharia civil.

O país dispõe de grandes reservas de gipsita, material que dá origem ao gesso, 1,2 bilhões¹ de toneladas [21], com largo potencial de exploração e excelente nível de pureza, chegando a 95%. O uso desse material para construção de casas, além de contribuir para com o setor construtivo, surge como mais uma alternativa de material com plena capacidade de substituição parcial ou total, os materiais atualmente utilizados em larga escala na indústria da construção civil. O gesso pelas características peculiares que apresenta, demonstra ser um material construtivo com padrão de excelência em acabamentos, fácil manuseio e estudos comprovados na redução financeira do custeio geral de obra, reduzido tempo de execução, além de ser um produto cujo processamento não costuma envolver altos custos energéticos.

Torna-se assim importante perspectivar o estudo desse tipo de construção, como uma forma de incremento de mais uma modalidade construtiva no Brasil e em outros países, sem, no entanto esquecer as exigências mínimas de conforto e eficiência energética. O contributo do estudo trará consequências positivas para o crescimento econômico regional e local.

O estudo do conforto térmico e da eficiência energética neste tipo de habitação constituiu um dos objetivos centrais desta Tese.

Dentre as questões urbanas que se vivenciaram no Brasil na segunda metade do século XX, figura como uma das principais, a precariedade habitacional que, embora esteja presente em quase todas as cidades brasileiras, vem se agravando desde a década de 1980, ocasionado por um período de estagnação na economia do país. Essa precariedade tem se expressado de forma desordenada dando origem às favelas, ocupação de praças, morros, áreas de mangues, margens de rios e córregos nas cidades, com maiores extensões vivenciadas nas grandes cidades; na elevada densidade populacional dos cortiços em regiões centrais e intermediárias; sem provimento de infraestruturas mínimas e equipamentos públicos.

A Fundação João Pinheiro [2] estima que o atual déficit habitacional brasileiro esteja em torno de sete milhões de unidades, considerando uma metodologia baseada em dois aspectos distintos: o quantitativo

¹ Bilhões=Mil milhões

do *déficit* habitacional, dimensionando o estoque de habitações e a inadequação de moradias, sendo aqui consideradas as especificidades internas desse estoque.

Segundo o CEDEPLAR/UFGM [8], entre 2007 e 2023, as demandas por uma habitação nesse período, somados ao déficit já acumulado de 7 milhões, culminariam numa necessidade total aproximada de 35 milhões de moradias. Dentre as cinco maiores regiões metropolitanas com mais de 1 milhão de habitantes, a população morando em favelas é sempre expressiva: RM São Paulo, 596 mil, RM Rio de Janeiro, 520 mil, Belém, 291 mil, RM Salvador, 290 mil e RM de Recife com 249 mil pessoas.

Baseado em dados estatísticos dessa natureza, surgiu a motivação para um estudo que possa apresentar a casa de gesso como uma opção em resolver a questão do *déficit* habitacional do Brasil, partindo do pressuposto que os edifícios construídos em gesso possam apresentar potencialidades a níveis de habitabilidade, conforto térmico e baixo consumo energético.

Refira-se que outros comportamentos devem ser analisados tais como: comportamento à água, durabilidade, comportamento acústico, manutenção, etc.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A Tese desenvolvida pretende analisar a existência de condições de conforto térmico e eficiência energética em casas de gesso construídas nos diversos climas existentes no Brasil, tendo para o efeito procedido à avaliação do conforto e da eficiência energética de um protótipo construído em blocos de gesso, em condições de serviço, investigando o consumo energético e a melhor adequabilidade dessas casas ao clima brasileiro.

A construção de habitações tem marcado a tendência do setor construtivo brasileiro nas últimas décadas. A atual política habitacional do país, objeto do Programa governamental de Aceleração do Crescimento (PAC), tem como objeto contemplar as pessoas de baixa renda que passaram a ter acesso ao crédito bancário e assim desta forma ascender à possibilidade de adquirir uma habitação nova. Por outro lado, dados censitários afirmam que há no país 7 milhões de edificações necessitando de obras de reabilitação e infraestrutura, constituindo um índice bastante significativo.

Desta forma pretendeu-se na elaboração da Tese, contribuir para uma abordagem metodológica do desempenho de moradias em blocos de gesso, que garantam índices de conforto térmico e pouca demanda de necessidades energéticas que possa tornar esta modalidade de construção viável.

Delineou-se 5 objetivos primordiais para o desenvolvimento da Tese, que passa-se a expor:

- 1) Caracterizar experimentalmente o desempenho higrotérmico de uma casa de gesso, em serviço, sendo referência e estudo de caso. Foram avaliadas as condições de conforto térmico dos usuários da casa de gesso. O conhecimento do desempenho térmico dos edifícios construídos em gesso, em serviço, é essencial para se prosseguir com as metas a serem implementadas neste estudo;
- 2) Validar um modelo de simulação numérica com recursos aos resultados de medição experimental, para em seguida proceder a um estudo de sensibilidade cujo objetivo é estudar o conforto térmico e a eficiência energética a partir das alterações de parâmetros térmicos estudados através de um conjunto de simulações determinadas no estudo;
- 3) Desenvolver um estudo de sensibilidade tendo particular atenção para dois cenários considerados “Melhor cenário” e “Pior cenário”, para 4 localizações no Brasil, verificando a influência de 4 parâmetros a saber, U_{parede} , $U_{cobertura}$, ventilação noturna e fator solar de

envidraçados, no conforto térmico e na eficiência energética de uma casa de gesso, utilizada para o estudo de caso;

- 4) Desenvolver um indicador de desconforto térmico passivo (IDTP) para o inverno e verão, tendo como base a temperatura de 25°C, para comparar os 54 cenários de simulação e avaliar através desse indicador, a influência das alterações de 4 parâmetros térmicos avaliados, e que compõe o conjunto de simulações executadas para a casa de gesso em 4 cidades: Petrolina, Recife, São Paulo e Curitiba;
- 5) Desenvolver um modelo de avaliação do desempenho térmico passivo do protótipo estudado em 4 cidades brasileiras, tendo por base a temperatura limite máxima de verão de 25°C em todas as cidades. Posteriormente, quantificou-se a temperatura operativa do modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 e reavaliou-se o IDTP para esta temperatura. Este modelo criado, subsidiará um conjunto de recomendações de adequabilidade das casas de gesso aos climas do Brasil.

A pesquisa teve como base as normas internacionais da série ISO - International Organization for Standardization e ASHRAE 55 [63], que culminaram por suprir a falta de métodos normativos de avaliar o conforto térmico por falta de uma legislação nacional específica sobre o tema.

Para cumprir os 5 objetivos principais delineados, foi necessário realizar um conjunto de tarefas, que se expõe a seguir:

- Realizou-se uma campanha experimental em um protótipo, por um período de um ano, caracterizando por completo o seu desempenho térmico, através da monitorização em contínuo da temperatura e umidade relativa do ar. Instrumentou-se a casa de gesso em serviço, na cidade de Petrolina, em dois períodos contínuos, inverno e verão, utilizou-se na instrumentação 10 sensores para medir a temperatura e umidade relativa do ar interior e exterior, e um equipamento de transmissão de dados à distância;
- Selecionou-se um programa de cálculo avançado em regime dinâmico com a finalidade de avaliar o desempenho térmico da casa de gesso;
- Criou-se um modelo computacional da casa de gesso-tipo para desenvolver o estudo de sensibilidade;
- Fez-se o tratamento e a interpretação dos resultados do estudo de sensibilidade dos cenários de simulação numérica estudados;
- Avaliou-se a influência da transmitância térmica de paredes e cobertura, da ventilação noturna e do fator solar dos envidraçados no conforto térmico e na eficiência energética da casa de gesso;

No estudo desenvolvido nesta Tese, pretende-se responder aos seguintes questionamentos:

- A casa de gesso é viável do ponto de vista de habitabilidade, conforto e eficiência energética?
- A ventilação noturna traduz um meio passivo suficiente para arrefecer as casas de gesso, no verão, e nas 4 regiões estudadas?
- Isolar as coberturas das casas de gesso se traduz num fato relevante nas regiões estudadas?
- O sombreamento das aberturas proporciona um incremento no conforto térmico?

No capítulo 9, dá-se a resposta a este conjunto de questionamentos.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

A Tese está encontra-se dividida em nove capítulos apresentados em síntese a seguir:

- O Capítulo 1 enquadra a Tese desenvolvida, apresenta os objetivos divididos entre geral e parciais e apresenta uma breve síntese de como está estruturado o texto;
- O Capítulo 2 foi dedicado ao estado da arte. Efetuou-se uma abordagem quanto à problemática do *déficit* habitacional brasileiro, da projeção das demandas habitacionais; como se processou a política habitacional no Brasil após o ano de 2003, aborda um estudo da política de promoção de casas pelo poder público nos últimos governos, faz-se uma exposição da política energética no Brasil, finalizando com uma abordagem do zoneamento bioclimático brasileiro, sua abrangência e seus diferentes climas predominantes. Neste capítulo, se expõe como a legislação brasileira trata do estudo do desempenho térmico de edificações construídas no país. São apresentadas também as duas normas, a NBR 15220 [42] relativas ao zoneamento bioclimático do país e a NBR 15575 [45], que faz referência ao desempenho térmico de edifícios residenciais unifamiliares e multifamiliares, além de um regulamento, O RTQ-R, cuja função está em complementar as duas normas no que se refere a questão da eficiência energética em edificações, além de sintetizar como tem avançado os núcleos de estudos no país, a destacar os trabalhos produzidos em Santa Catarina pelo LABEEE da UFSC;
- No Capítulo 3 estuda-se o conforto térmico, os conceitos relacionados ao conforto e os seus parâmetros de avaliação, faz uma exposição dos modelos de conforto propostos nas normas ASHRAE 55 [63], EN 15251 [64], ISO 7730 [61], aborda o modelo do LNEC com sua semelhança ao modelo da ASHRAE 55 e culmina com a apresentação e justificativa do modelo adotado para delinear o conforto nesta Tese. Neste capítulo ainda é exposto um estudo relativo a ventilação noturna e seus contributos para o conforto, bem como uma síntese dos estudos relacionados ao tema;
- O Capítulo 4 apresenta uma abordagem relacionada ao gesso, faz-se um estudo exploratório acerca do avanço dessa modalidade construtiva, em especial na região Nordeste do Brasil e suas projeções fora do país. Expõe-se um histórico nacional e internacional da legislação a respeito do uso do gesso como material construtivo. A questão durabilidade, abordada neste capítulo de forma simplória, não foi explorada nesta Tese por não agrupar dados que pudesse interferir nos objetivos propostos, sugerindo-se sua exploração em estudos futuros;
- O Capítulo 5 detalha o estudo de caracterização experimental do desempenho higrotérmico da casa de gesso-tipo, em serviço, tomado como estudo de caso. Inicia por detalhar os objetivos e a metodologia estabelecidos para delinear o estudo do capítulo, prosseguindo com a localização geográfica e alguns aspectos fisiográficos do local da casa de gesso estudada. Expõe-se uma caracterização da envoltória e geometria, detalha-se como foi efetuado a implantação dos sensores de medição de temperatura e umidade utilizados na recolha e medição dos dados climáticos temperatura do ar e umidade relativa. Proceda-se com a escolha do modelo adaptativo da ASHRAE 55 para se avaliar o conforto. Avalia-se as condições de conforto da casa de gesso, em serviço, para o inverno e verão. Ainda neste capítulo utiliza-se pela primeira vez no âmbito do LFC, o monitoramento de dados climáticos à distância entre o Brasil e Portugal;
- No Capítulo 6 descreve-se detalhadamente o estudo de simulação do comportamento térmico. Começa por delinear os objetivos e a metodologia adotada no estudo de simulação, apresenta-se o programa de cálculo avançado WUFIPlus utilizado para validação do modelo numérico. Descreve-se em detalhes as propriedades dos materiais e a geometria do modelo introduzidos no programa de simulação, define-se os ganhos internos e parâmetros

necessários ao procedimento da simulação em regime dinâmico. Finaliza-se o capítulo com uma análise dos resultados em duas estações, inverno e verão, obtidos no capítulo 5, estabelecendo-se uma análise entre os valores medidos e simulados, tornando validado o programa WUFIPlus para o estudo de sensibilidade no capítulo 7. Finaliza com as conclusões extraídas do capítulo;

- O Capítulo 7 descreve em detalhes o estudo de sensibilidade, começa-se por definir os objetivos e a metodologia do estudo. O estudo de sensibilidade inicia-se por expor um conjunto de cenários de simulações numéricas que se traduzem em fazer variar 4 parâmetros a saber: $U_{paredes}$, $U_{cobertura}$, ventilação noturna e fator solar de envidraçados, em 4 localidades do território, nas estações de inverno e verão. Seguidamente, avalia-se o desempenho térmico para 4 localizações no país, fazendo-se representar no mapa do Brasil, a influência destes parâmetros. Prossegue-se avaliando o consumo energético, para as 4 mesmas localizações anteriores, seguidos da sua representação no mapa do Brasil. Na sequência da avaliação, calcula-se o desconforto através de um Indicador de Desconforto Térmico Passivo de inverno e verão (IDTP-I e IDTP-V), procedendo-se sua representação no mapa do Brasil;
- O Capítulo 8 inicia por descrever os objetivos e metodologia adotados no estudo. Detalha-se através do modelo de conforto térmico da ASHRAE 55 [63] os cálculos da temperatura operativa de conforto para cada uma das 4 localizações do território nacional através das temperaturas médias mensais em cada localidade. Seguidamente criou-se uma escala de classes de desconforto passiva que avaliasse a casa de gesso tendo como ponto de partida um IDTP global de 01 ano para uma temperatura de 25°C. Estabeleceu-se uma análise da adequabilidade da casa de gesso através dessa escala para 54 cenários nas cidades de Petrolina e São Paulo, e 10 cenários para Curitiba e Recife. Prosseguiu-se na análise do desconforto nas 4 localidades numa nova escala de classes de conforto térmico, tendo como base a temperatura operativa de conforto calculada e utilizada como padrão de conforto em cada localidade. Finaliza-se o capítulo com um conjunto de recomendações capazes de nortear as construções de casas de gesso no Brasil, dentro de seus climas.
- No Capítulo 9 são apresentados as principais conclusões da tese e algumas perspectivas de trabalhos futuros a desenvolver no âmbito da Física das construções.

2. DÉFICIT HABITACIONAL BRASILEIRO E EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO TÉRMICO

2.1. PROBLEMÁTICA DO DÉFICIT HABITACIONAL BRASILEIRO

Maricato [1] afirma que uma parcela significativa da população brasileira vive em condições precárias de habitação.

Um estudo sobre o déficit habitacional Brasileiro, elaborado pela Fundação João Pinheiro (FJP) [2] em parceria com Ministério das Cidades, estimava que já em 2007 o déficit habitacional no Brasil já contabilizava cerca de 6,3 milhões de domicílios; e que outros 10,5 milhões de domicílios não eram dotados de qualquer infraestrutura. Estes dados levam a concluir que cerca de 40% a 50% da população dos grandes centros brasileiros vivem em condições precárias, sendo 20% em favelas.

Um estudo publicado pelo Ministério das Cidades-MC [3] no mesmo período assegura que 92% do déficit habitacional brasileiro corresponde a uma população com renda entre zero e 5 salários mínimos. Deste total, 84% faz referência aos brasileiros enquadrados faixa de renda entre 0 e 3 salários mínimos.

Dados elaborados pela Fundação João Pinheiro (FJP), [6] com base em dados estatísticos do IBGE/PNAD-2012 apontam haver no Brasil, apesar dos avanços do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do Governo Federal através do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), um *déficit* habitacional da ordem de 5,4 milhões, distribuídos entre 4,6 milhões de domicílios urbanos e aproximadamente 800 mil domicílios rurais. Em 2013, dados mais recentes publicados pela FJP e atualizados pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC em conjunto com o IBGE/PNAD, apontam para um *déficit* de 5,8 milhões de habitações, sendo esta quantidade dividida para 5 milhões para unidade urbanas e 800 mil para a carência de habitações rurais. É possível afirmar haver entre os anos de 2012 e 2013, um acréscimo de 7,4% no *déficit* habitacional brasileiro, o que equivale a um total de aproximadamente 400.000 imóveis em falta no país.

2.1.1. PATRIMÔNIO EDIFICADO BRASILEIRO

Segundo dados do IBGE (Censo Demográfico 2010), existem atualmente no Brasil cerca de 57,3 milhões de domicílios considerados particulares e permanentes. Há dez anos, segundo a mesma fonte, esses domicílios somavam 44,7 milhões, registrando um aumento da ordem de 28%. Salientam-se nestes valores que 87% desses domicílios são casas/habitações unifamiliares térreas. [4]

Nesse mesmo período a população brasileira cresceu de 169,8 milhões para 190,7 milhões (Tabela 1), representando no período um acréscimo de 12,3%, o que equivale a menos da metade do registrado

aumento de unidades habitacionais disponíveis no país, porém, esse aumento já caracteriza valores evolutivos na tentativa de minimizar a problemática habitacional do país.

Tabela 1 - População e distribuição Relativa (%) para o Brasil e Grandes Regiões [4]

Brasil e Grandes Regiões	População		Distribuição Relativa	
	2000	2010	2000	2010
Brasil	169.799.170	190.755.799	100,0	100,0
Norte	12.900.704	15.864.454	7,6	8,3
Nordeste	47.741.711	53.081.950	28,1	27,8
Sudeste	71.421.411	80.364.410	42,6	42,1
Sul	25.107.616	27.386.891	14,8	14,4
Centro-Oeste	11.636.728	14.058.094	6,9	7,4

Ainda segundo o IBGE, São Paulo, a cidade mais populosa e verticalizada do país, detém 12,8 milhões de habitações e desse total, 10,7 milhões (83,5%) são casas térreas/moradias. Piauí, Tocantins e Maranhão são os estados da federação em que a proporção de residências do tipo casas chega a índices de 97% das habitações.

Os últimos dados oficiais do IBGE [4] relativos ao tipo de habitação brasileira dão conta de um incremento de 43% no número de apartamentos que na última década (2000-2010) passou de 4,3 milhões para 6,1 milhões. Aproximadamente metade desse valor encontra-se na região Sudeste, distribuindo-se 1,8 milhões para São Paulo e 1 milhão para o Rio de Janeiro. O estado do Tocantins tem a menor concentração desse tipo de imóvel, somando apenas 5.447 apartamentos.

Da totalização dos 57,3 milhões de domicílios brasileiros, o IBGE afirma ter mais de 1 milhão de imóveis construídos em regime de vilas e condomínios.

As casas construídas em blocos de gesso não são contabilizadas nas estatísticas do IBGE/PNAD por não constituírem um número expressivo desse tipo de construção no país.

2.1.2. DÉFICIT HABITACIONAL QUANTITATIVO E QUALITATIVO NO BRASIL

Garcia e Castelo [5] consideram o *déficit* habitacional não só a falta de habitação, mas aquelas que são inabitáveis.

A quantificação do *déficit* habitacional no Brasil como um número a ser equacionado, apresenta dificuldades ao passo em que há no país, segundo dados da Fundação João Pinheiro de Minas Gerais (FJP), um estoque de 6 milhões de domicílios vagos/fechados e sem qualquer tipo de utilização [2].

No Brasil, ainda segundo a FJP, milhões de famílias encontram-se excluídas do acesso à moradia digna. Há uma necessidade quantitativa correspondente a 7,2 milhões de novas moradias. Destes valores; 5,5 milhões nas áreas urbanas e 1,7 milhões nas áreas rurais. O Sudeste (32,4%) e Nordeste (39,5%) são as regiões que representam as maiores demandas habitacionais do país (Tabela 2).

Tabela 2 - Estimativa do Déficit Habitacional Brasileiro [2]

ESPECIFICAÇÃO	DÉFICIT HABITACIONAL			PERCENTUAL RELATIVO DOS DOMICÍLIOS			PERCENTUAL ABSOLUTO DOS DOMICÍLIOS		
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
Brasil	7.222.645	5.469.851	1.752.794	16,1	14,6	23,7	100	100	100
Norte	848.696	506.671	342.025	30,2	24,8	44,6	11,8	9,3	19,5
Nordeste	2.851.197	1.811.553	1.039.644	25,0	22,2	32,1	39,5	33,1	59,3
Sudeste	2.341.698	2.162.187	179.511	11,6	11,7	10,4	32,4	39,5	10,2
Sul	678.879	565.217	113.662	9,4	9,5	8,9	9,4	10,3	6,5
Centro-Oeste	502.175	424.223	77.952	15,9	15,4	19,3	6,9	7,8	4,5

Há um predomínio das necessidades habitacionais, quantitativas e qualitativas, se concentrarem cada vez mais nas áreas urbanas e nas faixas mais baixas de renda da população, principalmente nas Regiões Metropolitanas.

Em 2000, 91% do *déficit* habitacional do País estabelecia correspondência com as famílias cuja renda financeira atingia até cinco salários mínimos.

Dados da Fundação João Pinheiro [6], apresentados na Tabela 3, mostram que 83% do *déficit* habitacional brasileiro corresponde às famílias que ganham até três salários mínimos. Os maiores quantitativos absolutos nesta questão de renda evidenciam as regiões Nordeste e Sudeste com (91,3%) e (77,6%) respectivamente.

Tabela 3 - Déficit Habitacional por Renda Familiar [6]

Renda Mensal em Salários Mínimos										
Território	Até 3 SM*		>3 a 5		>5 a 10		>10		Total	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Norte	343.301	84	29.235	7,2	28.258	6,9	6.456	1,6	408.792	100
Nordeste	1.554.079	91,3	87.333	5,1	35.963	2,1	11.604	0,7	1.703.071	100
Pernambuco	279.823	91,0	14.525	4,7	6.871	2,2	2.066	0,7	307.550	100
RM** Recife	164.652	88,3	9.585	5,1	5.322	2,9	1.039	0,6	186.000	100
Sudeste	1.694.803	77,6	239.257	11,0	154.648	7,1	64.613	3,0	2.184.990	100
Sul	465.063	80,9	54.020	9,4	38.404	6,7	14.286	2,5	575.083	100
Centro-Oeste	353.139	82,9	33.294	7,8	27.858	6,5	8.673	2,0	426.010	100
Brasil	4.410.385	83,2	443.139	8,4	285.131	5,4	101.632	1,9	5.297.946	100

SM*-Salário Mínimo

RM**-Região Metropolitana

2.1.3. POLÍTICA NACIONAL DE HABITAÇÃO APÓS 2003

Segundo Denaldi [10], numa breve retrospectiva de como vem sendo tratado a questão das políticas habitacionais no país, percebe-se uma ausência do estado no planejamento do setor, e mesmo aquando da intervenção deste, não foi possível atender a população de menor renda, em especial àquelas cujas rendas não ultrapassam três salários mínimos. Paralelamente, no que diz respeito à política urbana, também não houve contribuição no sentido de ampliar o acesso a terra urbanizada e moradia. Ainda segundo a autora, os instrumentos urbanísticos foram aplicados de forma a atender os interesses da elite e do mercado imobiliário, gerando com isso um aumento das desigualdades de caráter social e de espaço.

A partir do ano de 2003 ficou a cargo do Ministério das Cidades (MC) a função de coordenação, gestão e formulação da Política Nacional de Desenvolvimento Urbano, onde ficava incluída nesta, a nova Política Nacional de Habitação (PNH), cuja aprovação em novembro de 2004 estabelecia um novo modelo de organização institucional com base no Sistema Nacional de Habitação (SNH), cujo organograma pode ser visto pelo exposto na Fig. 1.

Desde então, o Sistema Nacional de Habitação passou a constituir o principal instrumento da Política Nacional de Habitação Brasileira, com conotação de instrumento participativo e democrático, prevendo a integração entre os três níveis de governo com os agentes públicos e privados envolvidos diretamente no tema da questão habitacional. O sistema ainda neste íterim assegura a articulação financeira de recursos onerosos e não onerosos necessários à implantação da política nacional de habitação, incluindo aí a criação de subsistemas cuja função atenderia o sistema de habitação de interesse social e o de habitação de mercado.

Até o ano de 2030 segundo E&Y [9], o país deve ter como meta, o equacionamento do *déficit* habitacional para atender ao surgimento de novas famílias. Segundo a organização, caberá à iniciativa privada suprir parte expressiva das necessidades geradas por esses novos núcleos familiares, de maneira que a política habitacional seja complementada por recursos necessários para a população de baixa renda. Ainda de acordo com E&Y [9], em 2030 o País terá um contingente estimado acima de 233 milhões de pessoas e cerca de 95,5 milhões de famílias. Nas condições demonstradas pelo estudo, há uma estimativa em média de 2,5 pessoas por moradia, o que culminará em cerca de 93,1 milhões de domicílios acarretando um crescimento de aproximadamente 66% em relação a 2007.

Nesse período, 37 milhões de moradias deverá surgir em todo o País, o que poderá atender o *déficit* com a construção em média de 1,6 milhão de novas residências por ano.

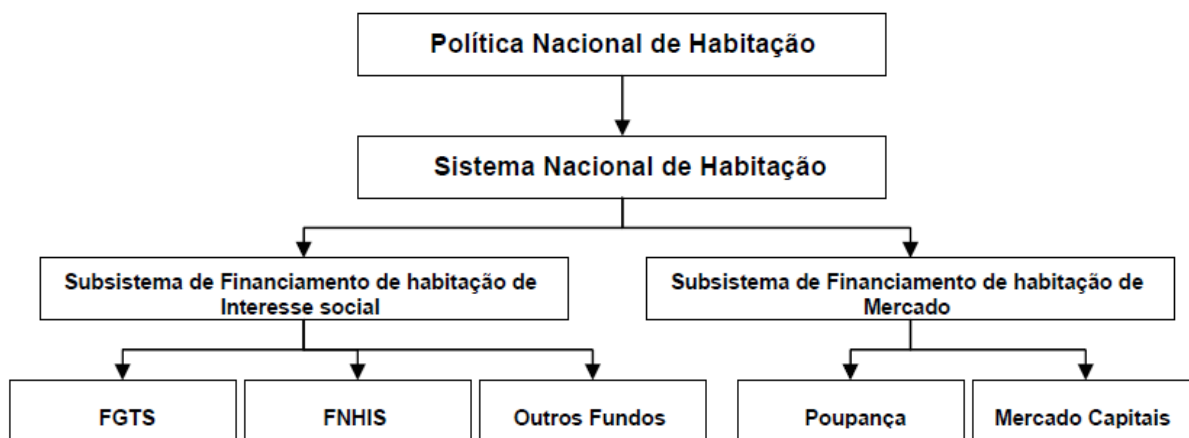


Fig. 1 - Organograma da Política Nacional de Habitação [3]

2.1.4. PROJEÇÃO DA DEMANDA HABITACIONAL DE 2007 A 2023 E PERSPECTIVAS FUTURAS DA QUESTÃO HABITACIONAL

Dimensionar o planejamento habitacional como meta a ser atingida em uma gestão a nível de governo, exige uma demanda de esforços conjuntos e um bom planejamento. A eficácia desse plano é consequência direta do quantitativo de recursos orçamentários alocados que entram em escala como importante critério do ponto de vista de solução da problemática habitacional.

É evidente que o *déficit* habitacional acumulado de um país constitui um desafio a ser enfrentado com aplicação de políticas habitacionais estabelecidas e com regras previamente elaboradas, mantendo uma interdependência de um conjunto de decisões cujas origens encontram-se inseridas em demandas locais.

Conforme estimativas cuja elaboração ficou a cargo da Fundação João Pinheiro de Minas Gerais e tendo como base informações da PNAD/IBGE [7], o *déficit* habitacional brasileiro já neste ano alcançava a cifra dos 7,9 milhões de unidades habitacionais novas. Segundo projeções realizadas pelo CEDEPLAR [8] e adotadas pelo PLANHAB (Plano Nacional de Habitação Brasileiro), no horizonte 2007-2023 essa demanda seria ainda da ordem de 27 milhões de unidades, levando em consideração a projeção de formação de cada família no período estimado.

Os resultados do estudo de demandas realizado pelo CEDEPLAR [8] podem ser apreciados através da análise da Tabela 4, onde é aplicada a abrangência de municípios envolvidos e a tipologia adotada (A a K). Ainda na Tabela 4 é possível verificar a forma de enquadramento dos municípios e regiões metropolitanas, bem como resumidamente os critérios econômicos e metodológicos utilizados na escolha dos municípios brasileiros a serem atendidos por ocasião do planejamento.

Tabela 4 - Tipologia dos Municípios urbanos e Região Metropolitana na classificação da demanda [8]

Abrangência	Tipologia	Regiões Envolvidas/Critérios
Municípios integrantes de regiões metropolitanas e municípios com mais de 100 mil habitantes	A	Regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo Metrópoles situadas em regiões de alta renda, com alta desigualdade social. São denominadas metrópoles globais pela concentração de atividades econômicas e fluxos econômicos financeiros.
	B	Regiões metropolitanas e principais aglomerações do centro-sul Metrópoles aglomerações urbanas e capitais situadas em regiões de alto estoque de riqueza. Grande importância funcional na rede de cidades. São consideradas cidades polos em suas respectivas regiões.
	C	Regiões metropolitanas e principais aglomerações e capitais prósperas do N e NE Principais centros polarizadores do Norte e Nordeste, com estoque de riqueza inferior aos tipos A e B, com maior concentração de pobreza e alta desigualdade.
	D	Aglomerados e centros regionais do Centro-Sul Municípios situados em regiões com alto estoque de riqueza, com importância como centros polarizadores em sua microrregião.

Abrangência (continuação da Tabela 4)	Tipologia	Regiões Envolvidas/Critérios
	E	Aglomerados e centros regionais N e NE Municípios com baixo estoque de riqueza, porém com grande importância regional. Cidades polos situadas em microrregião com menor dinamismo.
Municípios com população entre 20 e 100 mil habitantes	F	Centros urbanos em espaços rurais prósperos Municípios que estão crescendo moderadamente, situados nas microrregiões mais ricas do país. Têm mais condições de enfrentar o déficit com recursos próprios.
	G	Centros urbanos em espaços rurais consolidados com algum grau de dinamismo Municípios situados em microrregiões historicamente de maior pobreza e relativa estagnação, mas apresentam situação mais positiva em comparação aos demais tipos subsequentes.
	H	Centros urbanos em espaços rurais com elevada desigualdade e pobreza Municípios que se destacam pelos níveis mais elevados de pobreza, maior número de domicílios sem banheiro, e alto déficit habitacional relativo.
Municípios com população com menos de 20 mil habitantes	I	Pequenas cidades em espaços rurais próprios.
	J	Pequenas cidades em espaços rurais consolidados, mas de frágil dinamismo recente.
	K	Pequenas cidades em espaços rurais de pouca densidade econômica

Fonte: CEDEPLAR/ UFMG e Observatório das Metrópoles para o Ministério das Cidades. Elaboração: Instituto Via Pública, LabHab-FUPAM e Logos Engenharia. [8]

A tipologia (A a K) demandante e o quantitativo de municípios são apresentados no estudo elaborado pelo CEDEPLAR através de um mapeamento geográfico no território brasileiro (Fig. 2).

Os valores em termos absolutos previstos no estudo são apresentados na Tabela 5 para os quatro quadriênios de 2007 a 2023.

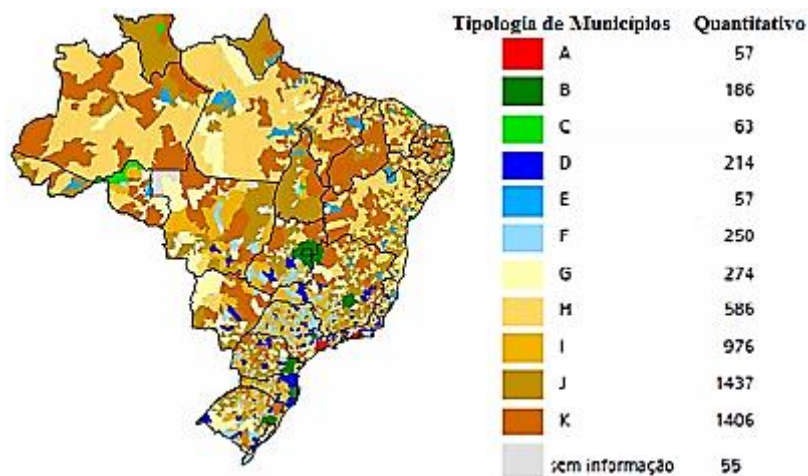


Fig. 2 - Mapeamento da Demanda por Tipologia no Brasil [8]

Em uma análise mais crítica da Tabela 5 e da Fig. 2, verifica-se que a abrangência de municípios contemplados no estudo elaborado pelo CEDEPLAR/UFMG, ficava mais voltado aos municípios inseridos nas tipologias de classes I, J e K, correspondendo àqueles com população com menos de 20 mil habitantes, com características predominantes rurais e pouca densidade econômica. Esse critério abrange em sua maior parte os municípios situados nas regiões Nordeste e Norte, e com pouca abrangência às regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Tabela 5 - Projeção Habitacional Futura Para Quatro Quadriênios 2007-2023 [8]

Projeção da Demanda							
Especificação	Déficit Acumulado	2007-2011	2012-2015	2015-2019	2020-2023	Total 2007-2023	Necessidades Totais
Necessidade de Unidades Novas	7,90	8,73	5,20	5,86	7,19	26,98	34,9
Domicílios em Assentamentos Precários	3,26						
Domicílios com Necessidade de Complementação de Infraestrutura	9,83						

Em termos globais, essa estimativa segundo o PLANHAB, somaria cerca de 35 milhões de unidades habitacionais. Esses números seriam suficientes para atender o déficit previsto e atender a todas as famílias que se formariam neste intervalo de 15 anos, facultando o acesso a uma unidade habitacional ao fim do período

Tabela 6 - Cenário das Necessidades Habitacionais Totais (2007-2023) Brasil (em milhões de unidades).

Tipologias de Municípios		Domicílios a serem acrescidos				TOTAL	
		2007-2011	2012-2015	2016-2019	2020-2023		
URBANO	A	1.235.178	714.974	815.067	1.044.013	3.809.231	14,1%
	B	945.998	545.023	613.798	757.517	2.862.335	10,6%
	C	617.374	363.949	402.550	500.603	1.884.476	7,0%
	D	1.066.716	647.237	738.116	897.491	3.349.560	12,4%
	E	631.529	394.835	438.514	524.028	1.988.907	7,4%
	F	453.464	270.167	306.664	380.763	1.411.059	5,2%
	G	535.381	323.977	364.458	438.356	1.662.172	6,2%
	H	577.029	344.543	383.070	466.415	1.771.057	6,6%
	I	240.127	144.579	163.823	201.015	749.544	2,8%
	J	346.961	211.118	236.347	283.204	1.077.630	4,0%
	K	324.031	192.796	215.272	259.717	991.815	3,7%
RURAL		1.757.171	1.056.528	1.184.785	1.432.083	5.430.567	20,1%
TOTAL		8.730.960	5.209.726	5.862.462	7.185.205	26.988.353	100,0%
		32,4%	19,3%	21,7%	26,6%	100,0%	

Fonte: Consórcio Instituto Via Pública, LabHab-FUPAM, Logos Engenharia a partir de dados da Fundação João Pinheiro, 2006 / CEDEPLAR

2.1.5. ESTATÍSTICA DOS PADRÕES HABITACIONAIS BRASILEIRO

De acordo com o LIT (Levantamento de informações territoriais) realizado com base no Censo Demográfico IBGE [4] e pela primeira vez neste trabalho de recenseamento, a região Sudeste reúne praticamente metade dos domicílios situados nas comunidades carentes existentes em todo o país. Segundo o levantamento efetuado a partir de coleta de dados em 323 municípios brasileiros onde se registra a existência de favelas, Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo concentram 49,8% do total de casas nestas áreas no Brasil.

Dos cerca de 3,2 milhões de domicílios em aglomerados subnormais, como são denominadas as favelas² pelo IBGE, levantados nas 27 unidades da federação; 1,6 milhão se encontram no Sudeste, que é a região mais populosa do país. O Nordeste conta como a segunda região entre os maiores números de habitações em comunidades carentes, com 28,5% o que equivale a 926 mil domicílios. Seguidamente, aparece a região Norte, com 14,4% totalizando 463 mil domicílios, o Sul do país, com 5,3% num total de 57 mil unidades, por último, a região de menor concentração, o Centro-Oeste, contabilizando apenas 1,8%, correspondendo a uma totalização de 170 mil habitações (Fig. 3). Segundo o levantamento do censo 2010, vivem em favelas no Brasil 11,4 milhões de pessoas.

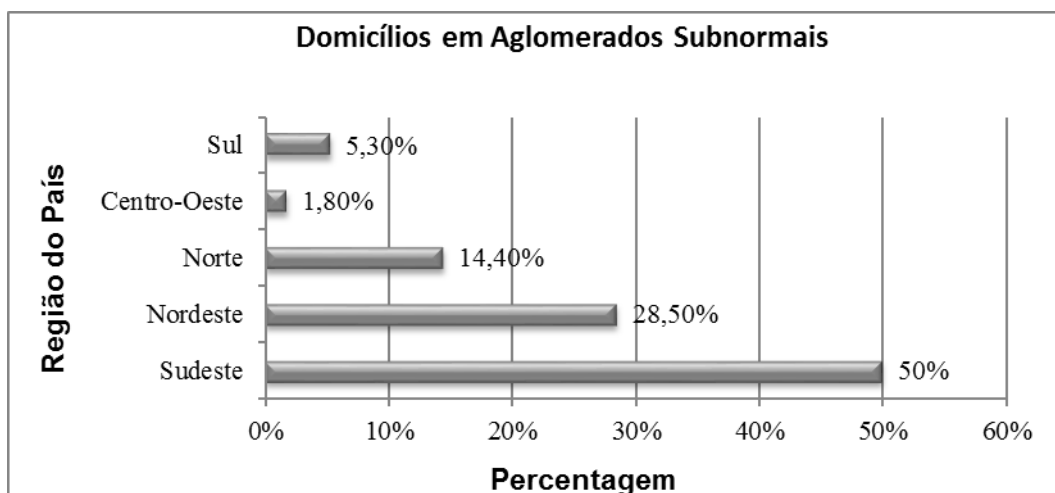


Fig. 3 - Distribuição de Aglomerados Subnormais no Brasil [4]

A região Sudeste detentora dos 50% de habitações consideradas aglomerados subnormais, forma o complexo mais populoso do país com 80,3 milhões de habitantes segundo o censo IBGE de 2010, possui uma área territorial de 924.500 Km² e uma densidade demográfica de 87 habitantes/Km². O Centro-Oeste, responde por um menor percentual (1,8%), é formado por apenas três estados, Goiás, Mato Grosso e Mato-grosso do Sul, além do distrito Federal, possui o menor complexo populacional do país, com 14,9 milhões de pessoas e 9,4 habitantes por Km².

Em síntese, é possível afirmar pelos dados apresentados na Fig. 3, censo demográfico IBGE/2010, que vivem em favelas no Brasil, 11,4 milhões de pessoas, considerando uma família de um casal e dois filhos [4].

² Espaços com pelo menos 51 domicílios carentes de serviços públicos essenciais, ocupando terrenos alheios geralmente dispostos de forma desordenada.

2.1.6. PROMOÇÃO DE CASAS OFERTADAS PELO PODER PÚBLICO

Em março de 2009, o governo através do Ministério das Cidades (MC) baseado em estudos da FJP e da PNH, criou o Projeto Minha Casa Minha Vida (PMCMV).

De acordo com a Lei 11.977 de 7 de julho de 2009 [11], no seu Artigo 2º, ficou implantado o PMCMV, cuja finalidade tinha como objeto a criação de mecanismos de incentivo à produção e à aquisição de novas unidades habitacionais contemplando famílias com renda salarial de até 10 salários mínimos residentes em municípios brasileiro que faziam parte de uma demanda habitacional presente. [11].

Em termos quantitativos, o PMCMV inicialmente previa a construção de um milhão de moradias distribuídas de acordo com a faixa salarial mensal da população, contemplando 400 mil famílias com renda de até três salários mínimos, 400 mil com renda entre três e seis salários e 200 mil com faixa salarial entre seis e dez salários. Os números iniciais segundo a Lei 11.977, não resolveria por completo o *déficit* habitacional, porém, constituía um dos primeiros programas habitacionais ofertado pelo governo federal em parceria com o Ministério das Cidades, cuja gestão operacional competia à instituição bancária Caixa Econômica Federal (CEF), tornando esta uma importante parceira no tocante às políticas habitacionais no Brasil. A Fig. 4 vem de forma sucinta ilustrar os investimentos ofertados pelo poder público em habitação até o ano de 2015 e demonstra um período de estagnação com pouco crescimento dos investimentos no setor anteriormente à promulgação da Lei 11.977 de julho de 2009.

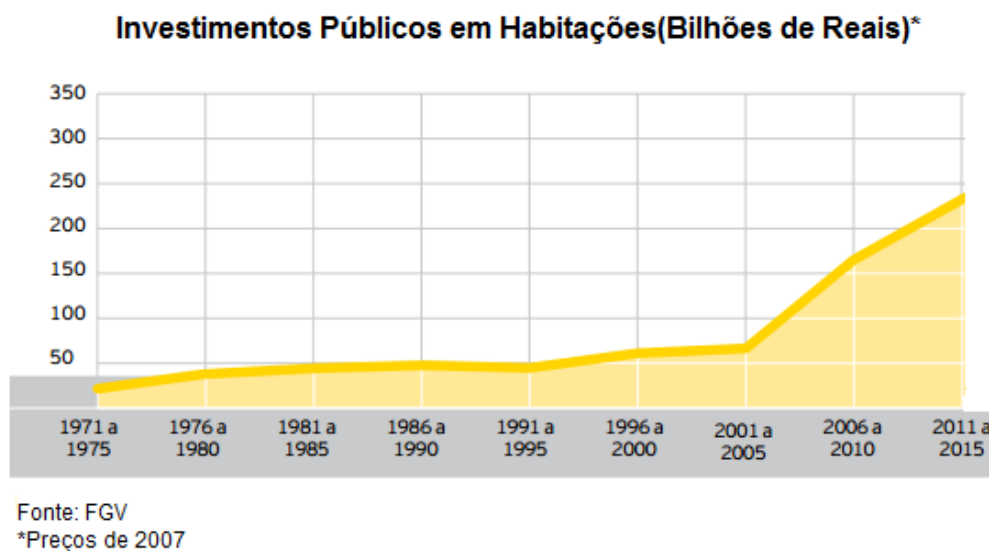


Fig. 4 - Subsídios Para a Política Habitacional (adaptado de FGV)

Em suma, os recursos financeiros cujo destino conduzia à urbanização de assentamentos precários (locais onde as pessoas podem viver) teve um expressivo incremento com a criação do Programa governamental de Aceleração do Crescimento (PAC), que destinou cerca de R\$ 11 bilhões no período de 2007 a 2010. A prioridade desse programa do governo incluiu as regiões metropolitanas dos grandes centros, aglomerados urbanos e cidades com mais de 150 mil habitantes onde predomina grande parte de assentamentos precários.

2.2. A QUESTÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA

Desde a crise do petróleo ocasionada pela redução no fornecimento na década de 70, praticamente todo o mundo vem debatendo a questão energética, principalmente nos países desenvolvidos, cuja matriz energética depende quase na sua totalidade desse recurso. O Brasil por outro lado, manteve à época uma posição favorável relacionado a outros países, uma vez que sua matriz energética tem grande parte fundamentada em fontes renováveis. [17]

Entretanto, apesar da larga matriz energética, em meados dos anos 80, o Brasil passa a enfrentar alguns problemas relacionados à crise de energia motivado por uma demanda, que no momento superava o crescimento da produção, dando-se início às primeiras ações que referenciava o tema eficiência energética no país. Neste íterim, destaca-se a criação do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), instituído pelo Ministério das Minas e Energia (MME) em 1985, cujo objeto principal centrava na política da promoção e ampliação da produção. Desde então, o PROCEL tem avançado nos trabalhos de eficiência energética no país, promovendo de forma abrangente o estabelecimento de parcerias e pesquisas relacionadas ao tema, configurando assim um órgão referencial no país [12].

Apesar de inúmeros esforços, em 2001 o Brasil volta a enfrentar uma crise energética obrigando toda a população a cumprir uma meta de redução de 20% do consumo de eletricidade ocasionado por um mau planejamento do setor (DIEESE, 2001). Neste ano, foi instituída a Lei nº 10295 [16], estabelecendo níveis máximos de consumo específico de energia para máquinas e aparelhos elétricos fabricados no país. (BRASIL, 2001B). No entanto, em sentido contrário do que previa a lei, a mudança na forma de vida das pessoas decorrente do aumento populacional das cidades, com aquisição de novos bens de consumo e a introdução de energia onde antes não havia, contribuíram como fatores responsáveis no incremento do consumo energético, apesar dos esforços governamentais no sentido de incentivar o baixo consumo. A Fig. 5 ilustra um comparativo entre o consumo energético e o crescimento populacional no período.

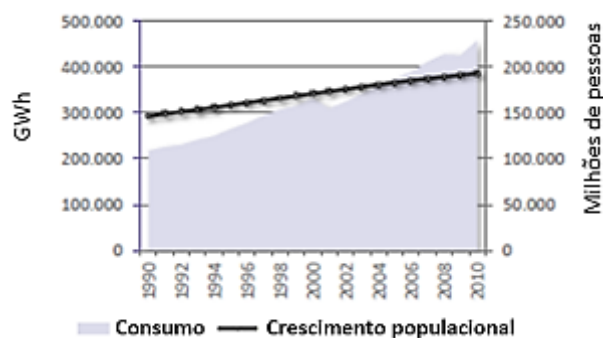


Fig. 5 - Crescimento demográfico VS. Aumento do consumo energético-Período 1990 a 2010 [4]

2.2.1. USO DE ENERGIA NO BRASIL E NO MUNDO

A energia em seu sentido mais amplo desempenha um papel fundamental para a sociedade. Funciona como elemento chave na questão social facultando a essa um desenvolvimento de forma sustentável e, nomeadamente melhoria da qualidade de vida. [12].

A busca por melhores condições de conforto interior das habitações contribui para o consumo de grande parte da oferta de energia elétrica residencial. Notadamente nos países em desenvolvimento, os projetos

atuais tem feito uso em grande escala de mecanismos para refrigeração artificial, aumentando em muito o consumo de energia elétrica, desnecessariamente.

Huberman e Pearlmutter [13] afirmam que as demandas mundiais por energia mostram uma tendência de crescimento que poderá atingir índices de 71% entre os anos de 2003 e 2030, motivados pelas necessidades na busca de conforto térmico em edificações. Estudos realizados por Kuznik et al [14] na França, apontam um crescimento de energia na ordem de 30% nos últimos 30 anos somente em edificações.

De acordo com Achão [15], apesar do ritmo ascensional de crescimento da energia no Brasil, esta ainda enfrenta problemas de distribuição por região e classe social, implicando diretamente na oferta desigual de conforto.

No Brasil nos últimos anos, têm-se desenvolvido relevantes estudos evidenciando o tema eficiência energética no segmento de edificações. Essas pesquisas vêm sendo incentivadas pelo governo federal, em atendimento ao que preconiza a Lei 10295 [16], no seu artigo 4º, através do Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica-PROCEL, com a participação de outras entidades. Já existe no país um diagnóstico confiável dos principais problemas decorrentes, ações necessárias e centros de excelência com conhecimentos especializados em temas específicos da área.

2.2.2. CONSUMOS ESPECÍFICOS SETORIZADOS

Um tema que tem despertado interesse e estudos em todo o mundo, o balanço da questão energética, envolvendo sua produção e demanda, tem também despertado motivos de preocupação.

Em análise aos dados de consumo energético setorizado fornecido pelo BEN-Balanco Energético Nacional [17], é possível perceber a predominância de consumo do setor industrial respondendo por 44% do total da oferta energética, caracterizando a boa fase de desenvolvimento industrial a qual vem passando o Brasil. Somados os demais setores residencial, comercial e público (47%), percebe-se uma diferença de 3% quando comparado ao consumo industrial, fazendo com que estes setores demandantes sejam os de maior preocupação, em especial o setor residencial (Fig. 6).



Fig. 6 - Consumo Percentual Setorizado de Energia Elétrica-Brasil [17]

No âmbito desta tese, a importância maior será dada ao setor residencial, responsável por 24% do consumo de energia elétrica do país em 2009, cujos índices têm apresentando taxas crescentes médias de 5,7% ao ano para os registros no período de 1975 a 2009 [17].

Dentre os fatores que contribuíram para esse incremento, é possível destacar:

- Aumento da renda, nomeadamente das classes de baixo poder aquisitivo;
- Crescimento substancial de domicílios e introdução de ramais de ligação de energia de unidades que não eram atendidos por redes elétricas;
- Incremento na compra de bens de usos domésticos demandantes de energia elétrica, em especial pela classe média e pobre;
- Facilidade e obtenção de linhas de crédito;
- Criação de pequenos negócios informais, nas residências.

A Fig. 7 apresenta a origem por setor de produção de energia e os números da matriz energética brasileira para os anos de 2013 e 2014 apresentados pelo Balanço Energético Nacional – BEN-2015[19].

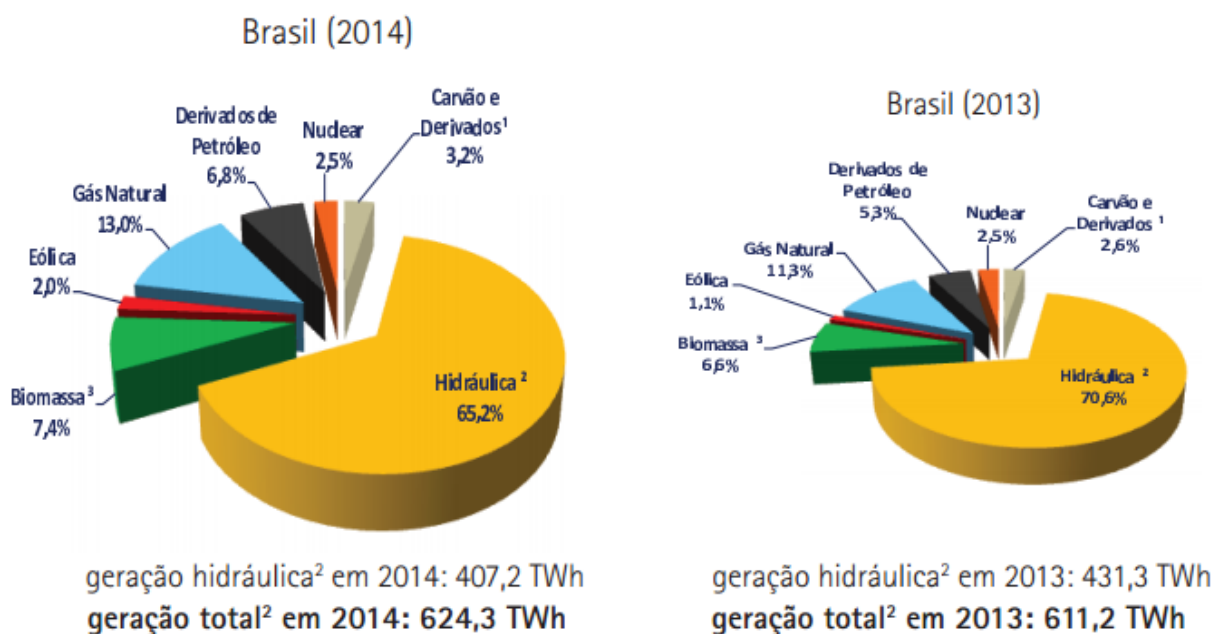


Fig. 7 – Matriz Energética Interna do Brasil por Setor [19]

Através da Fig. 7 é possível observar na matriz energética do Brasil, uma predominância da geração de energia proveniente de fontes hidráulicas, no entanto, nos últimos anos 2013 e 2014, devido às condições hidrológicas desfavoráveis observadas ao longo do período, houve redução da oferta de energia hidráulica. Em 2014 o decréscimo foi de 5,5% em relação a 2013 notado neste tipo de fonte de geração energética. Neste mesmo período, registra-se o crescimento da energia eólica com um salto de produção de energia de aproximadamente 1% na matriz. Em 2014 a energia eólica representou um incremento de 12,1 mil GWh na produção total, com 167 parques eólicos instalados no país. Em 2015 foram concluídas e entraram em operação mais de 100 usinas eólicas no Brasil, registrando um crescimento de 57% no referido ano. O Brasil ocupa atualmente o 4º país do mundo em que a energia eólica mais cresceu.

2.2.3. SÍNTESE

Por fim, expõe-se neste capítulo um panorama geral de oferta e consumo de energia no Brasil no ano de 2014. Cabe ressaltar que a base das informações aqui apresentadas são dados disponibilizados pelo BEN-2015, ano base 2014. Foi possível observar os fatores que no Brasil tem contribuído para o aumento do consumo energético, mostrar setores em crescimento na produção de energia limpa na matriz energética, bem como como vem evoluindo este setor no Brasil. Por outro lado, têm-se observado também um crescimento acelerado da população e consequentemente aumento da demanda energética, fato que justifica o avanço nas pesquisas por novas construções, com novos materiais, a exemplo do que se propõe nesta Tese.

No capítulo seguinte, passa-se à expor um estudo da divisão do país em zonas bioclimáticas, constantes da NBR 15220-3.

2.3. ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO

O Zoneamento Bioclimático Brasileiro faz parte da NBR 15220-3 [42], em vigor desde 2005. Consiste na divisão do território brasileiro em 8 zonas climáticas. Para cada zona, a norma faz recomendações de estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social.

O objetivo das recomendações técnico-construtivas normativas é a otimização do desempenho térmico das edificações através de uma melhor adequação climática. As estratégias de condicionamento ambiental recomendadas pela mesma norma são baseadas na carta bioclimática de Givoni [79] e nas planilhas de Mahoney [43].

A NBR 15220-3 [42] divide o país em 8 zonas bioclimáticas, sendo consideradas neste trabalho as abreviações (ZB1, ZB2, ZB3, ZB4, ZB5, ZB6, ZB7 e ZB8) para cada uma das zonas. A zona 1 é a mais fria e também a menor área de representação no país (0,8%). A zona 8, a mais quente e maior zona bioclimática em termos percentuais (57%) de abrangência, engloba as regiões Norte e Nordeste, e grande parte do litoral brasileiro (Fig. 8).

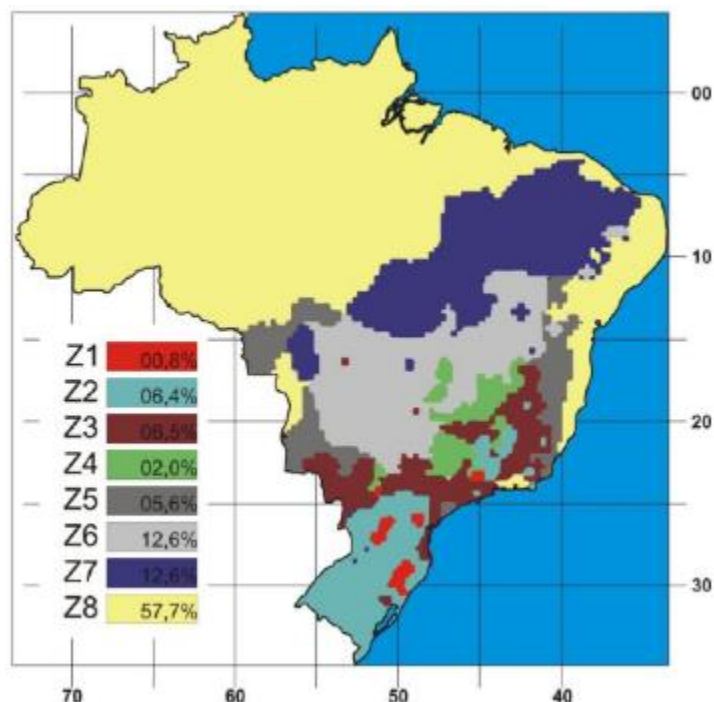


Fig. 8 - Mapa de Divisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro [43]

Zona Bioclimática 1-[ZB1]

A ZB1 envolve um total de 12 cidades brasileiras, com forte predominância destas cidades na região Sul do país. Exemplo são as cidades de Caxias do Sul (RS), Lages (SC), Curitiba (PR) e Poços de Caldas (MG) situada na região Sudeste. Para esta Zona Bioclimática, a NBR 15220-3[42] recomenda como estratégia de condicionamento térmico passivo, vedações internas pesadas com maior inércia térmica e aquecimento solar das edificações na estação inverno. As Fig. 9 e Fig. 10 ilustram os dados climáticos de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Curitiba (PR), inserida na zona bioclimática 1.

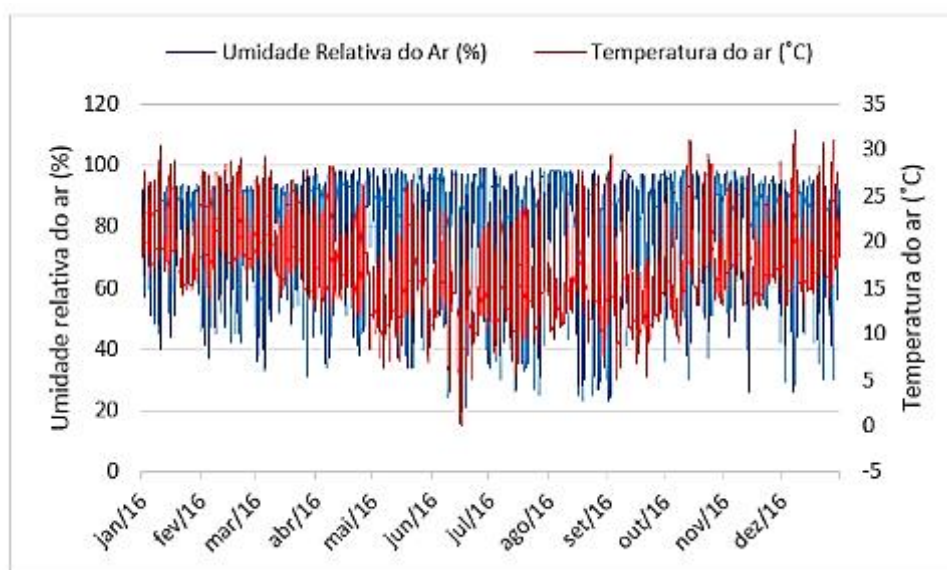


Fig. 9 - Variação de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Curitiba [110]

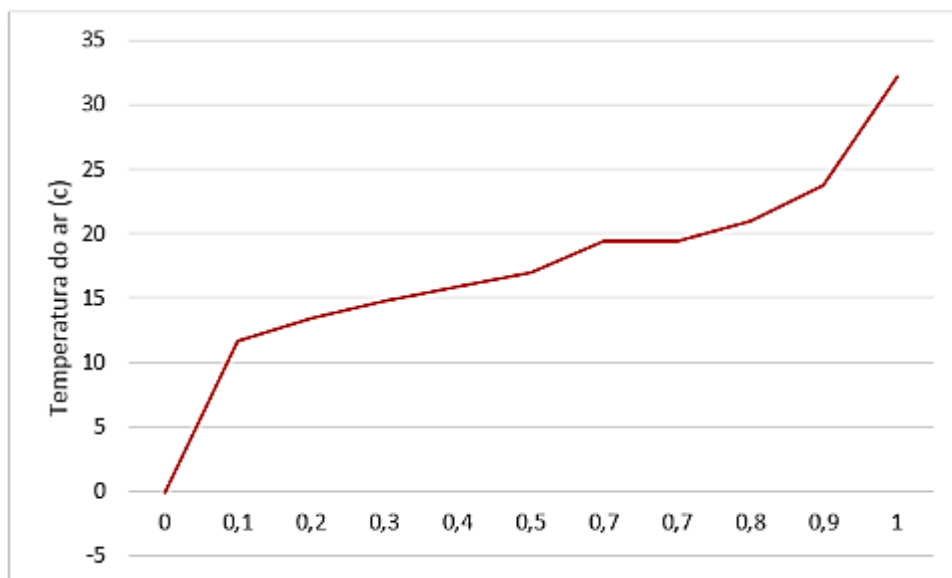


Fig. 10 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Curitiba

Zona Bioclimática 2-[ZB2]

São 33 cidades brasileiras que compõem a ZB2, com maior predomínio destas na região sul do país. Há um número menor com estas mesmas características climáticas na região Sudeste do Brasil. Dentre algumas cidades inseridas nesta zona bioclimática, estão os casos de Alegrete (RS) e Nova Friburgo (RJ). A NBR 15220 na sua terceira parte, indica para esta zona Bioclimática 2, prescreve estratégias de condicionamento para as estações de verão e inverno e prescreve o uso da ventilação cruzada no verão, sugere para o inverno o aquecimento solar e indica vedações internas pesadas para a esta estação. Para esta Zona Bioclimática ZB2, a norma indica aberturas médias permitindo a entrada de sol durante a estação de inverno [43]. As Fig. 11 e Fig. 12 ilustram os dados climatológicos de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Passo Fundo (RS), inserida na zona bioclimática 2.

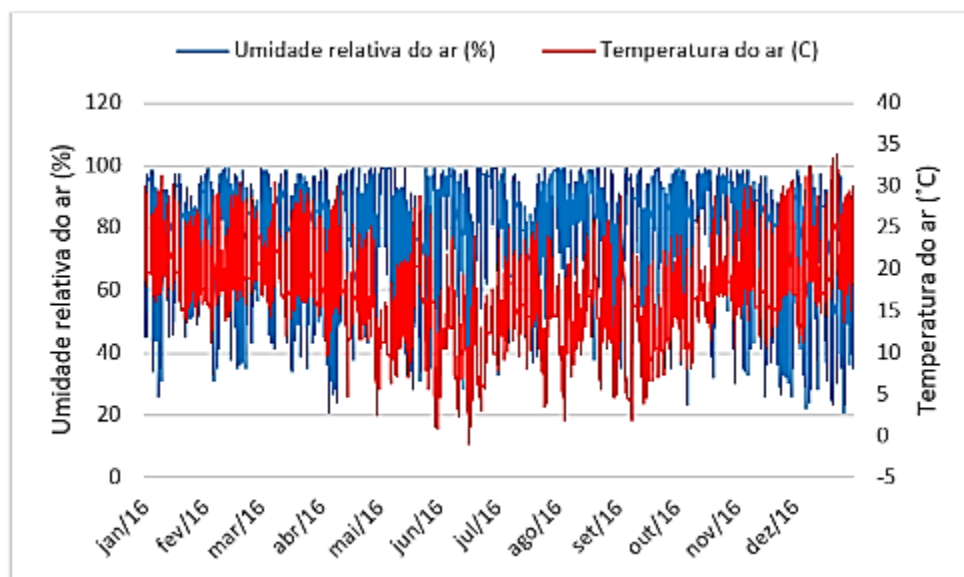


Fig. 11 - Variação de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Passo Fundo [110]

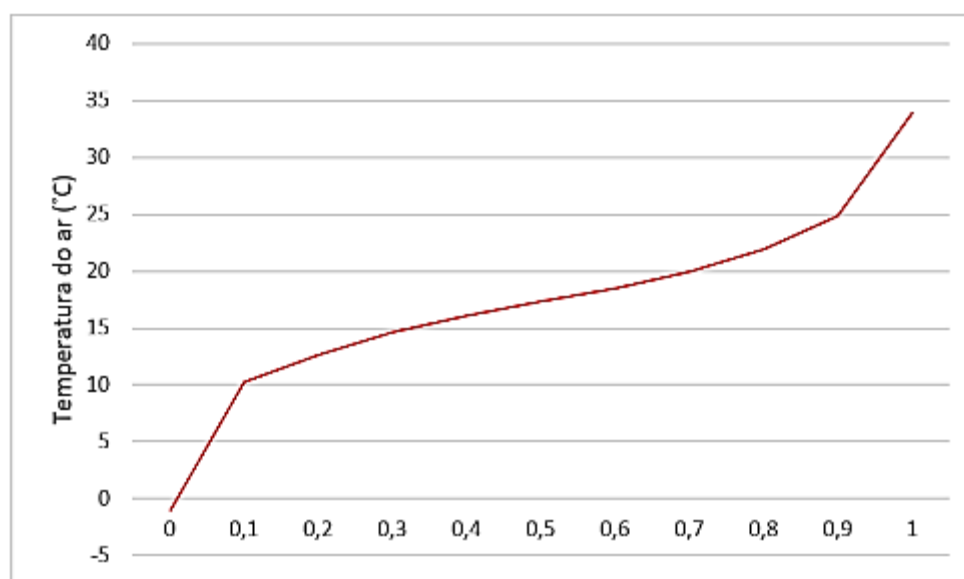


Fig. 12 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Passo Fundo

Zona Bioclimática 3-[ZB3]

São 62 cidades que compõem a ZB3. Dentre estas cidades, está São Paulo, a maior concentração populacional do país.

A NBR 15220-3 prescreve estratégias de condicionamento para esta ZB3. Prevê a adoção da ventilação cruzada para o período de verão como estratégia de condicionamento térmico passivo, e aquecimento solar para a estação de inverno. Indica ainda como estratégia para as vedações externas, paredes leves refletoras e coberturas leves, porém isoladas [42]. As aberturas devem ser médias e permitir a entrada de sol durante o inverno. As Fig. 13 e 14 ilustram os dados climáticos da temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de São Paulo

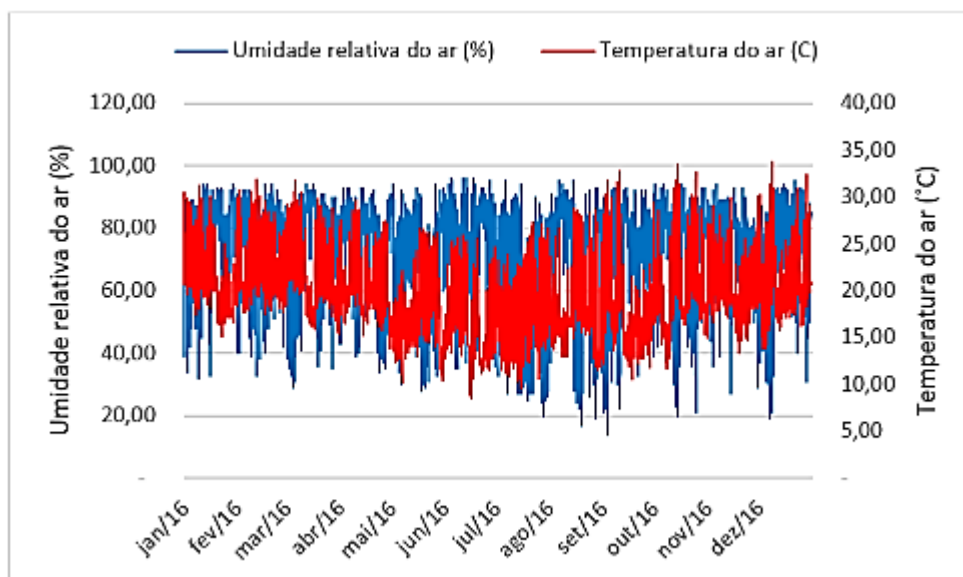


Fig. 13 - Variação de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de São Paulo [110]

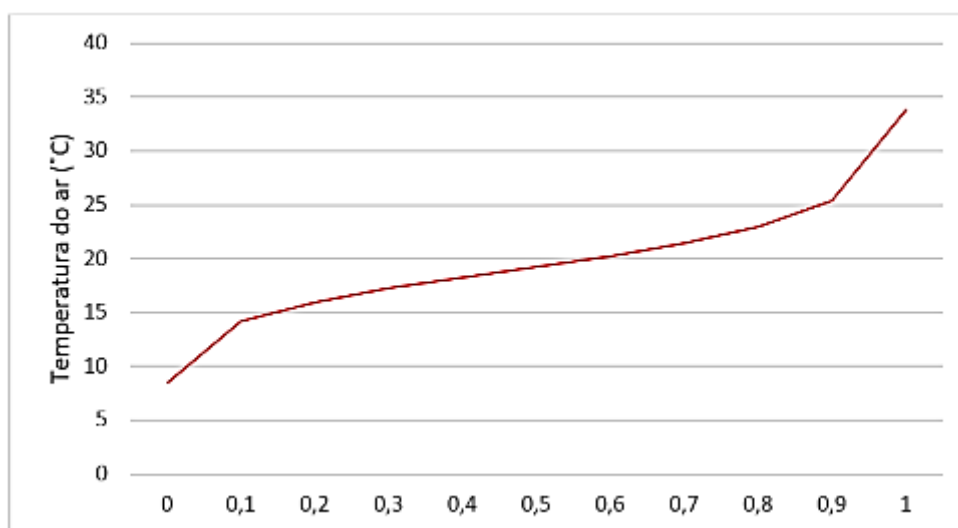


Fig. 14 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de São Paulo

Zona Bioclimática 4 -[ZB4]

Para esta ZB4, a NBR 15220-3 estabelece como estratégia de condicionamento térmico passivo, o resfriamento evaporativo e a ventilação seletiva, para o período de verão, e aquecimento solar das edificações, bem como vedações internas pesadas, ou seja, exigência maior para a inércia térmica nas edificações, para o período de inverno. Em relação às vedações externas, a recomendação da norma indica paredes de grande massa. No entanto, recomenda que a cobertura pode ser leve, porém, deve ser isolada.

Para a cidade de Brasília, capital do país situada nesta zona bioclimática 4, é verificado através das Fig. 15 e Fig. 16, uma reduzida umidade relativa em quase todo o ano e valores mínimos críticos entre os meses de agosto a outubro, com índices abaixo dos 40%.

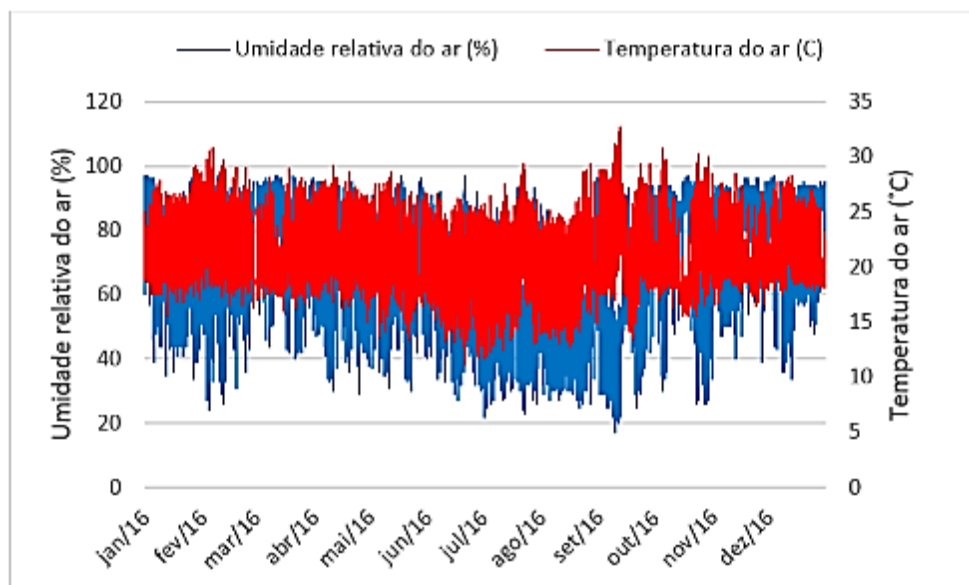


Fig. 15 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Brasília [110]

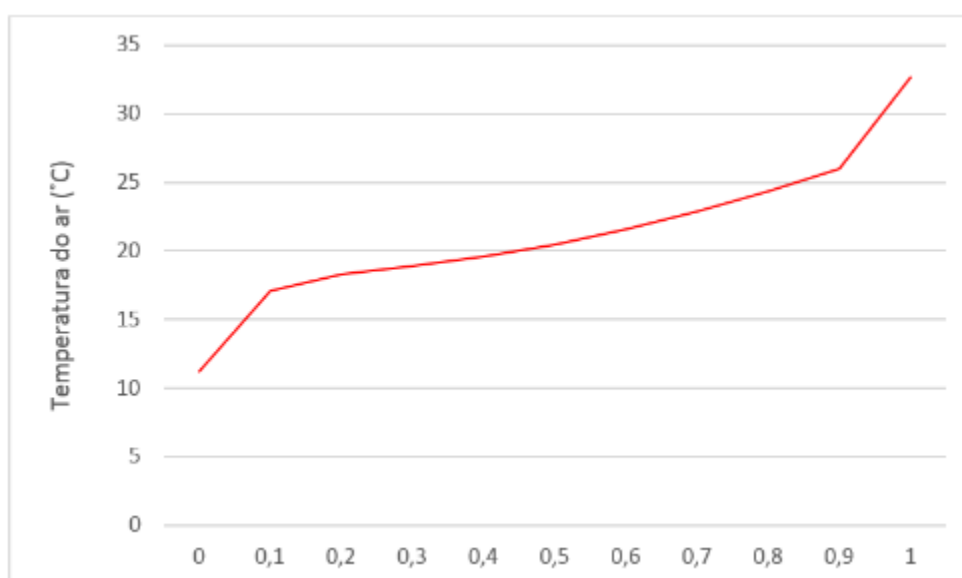


Fig. 16 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para Brasília

Zona Bioclimática 5-[ZB5]

A norma NBR 15220-3 [42] recomenda para esta zona, o uso da ventilação cruzada na estação de verão e vedações internas pesadas para a estação de inverno como estratégias de condicionamento térmico passivo nesta zona bioclimática. As aberturas para ventilação nesta zona bioclimática devem ser médias, no entanto, a norma indica o sombreamento dessas aberturas. Na região Nordeste, encontram-se inseridas nesta zona 5, as cidades de Garanhuns-PE, Triunfo-PE, Morro do chapéu-BA e Guaramiranga-CE. Na Região Sudeste, as cidades de Niterói-RJ, Governador Valadares e Pedra Azul no estado de Minas Gerais.

As Fig.17 e Fig.18 ilustram os dados climáticos para a cidade de Niterói, no estado do Rio de Janeiro.

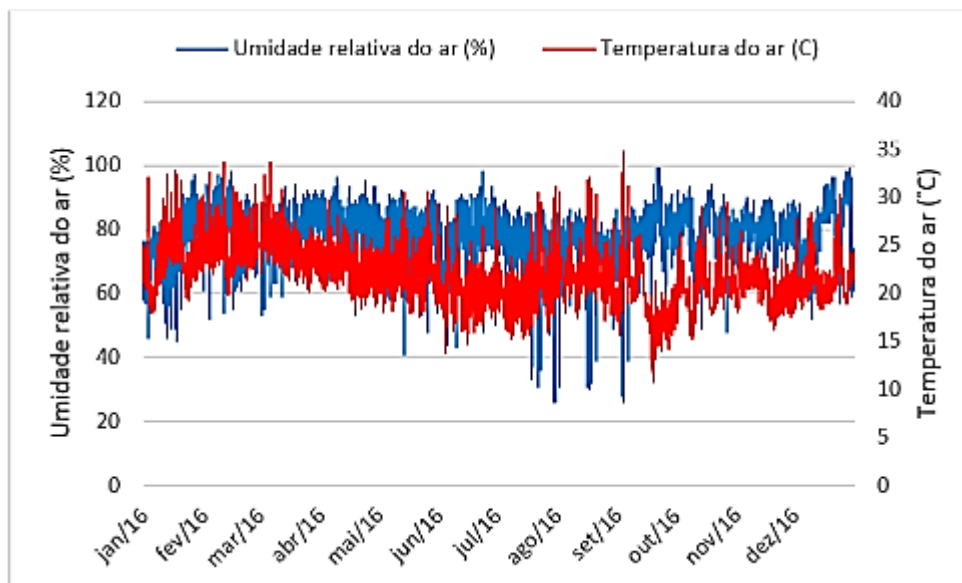


Fig. 17 – Variação da temperatura e umidade relativa para a cidade de Niterói [110]

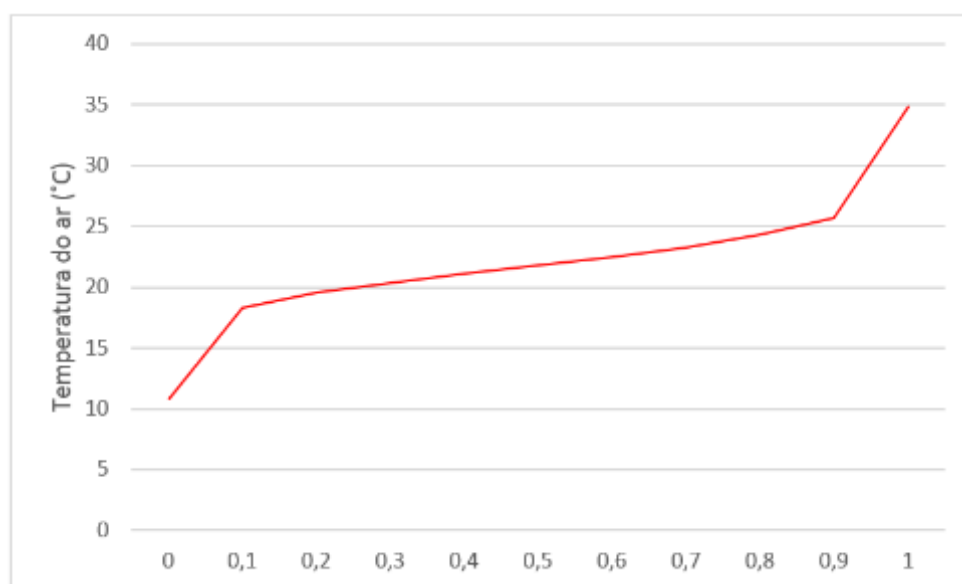


Fig. 18 - Curva de probabilidade acumulada da temperatura do ar para Niterói

Zona Bioclimática 6-[ZB6]

As prescrições da NBR 15220-3[42] para a ZB6 recomenda o uso da ventilação seletiva (para os períodos em que a temperatura interna seja superior à temperatura externa), o que se verifica pelas temperaturas elevadas em boa parte do ano. As vedações segundo recomendações normativa, devem ser com paredes pesadas e a cobertura podendo ser leve, no entanto, isolada. As aberturas devem ser médias e sombreadas.

As Fig. 19 e Fig. 20 a seguir detalham os dados de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Bom Jesus da Lapa-BA.

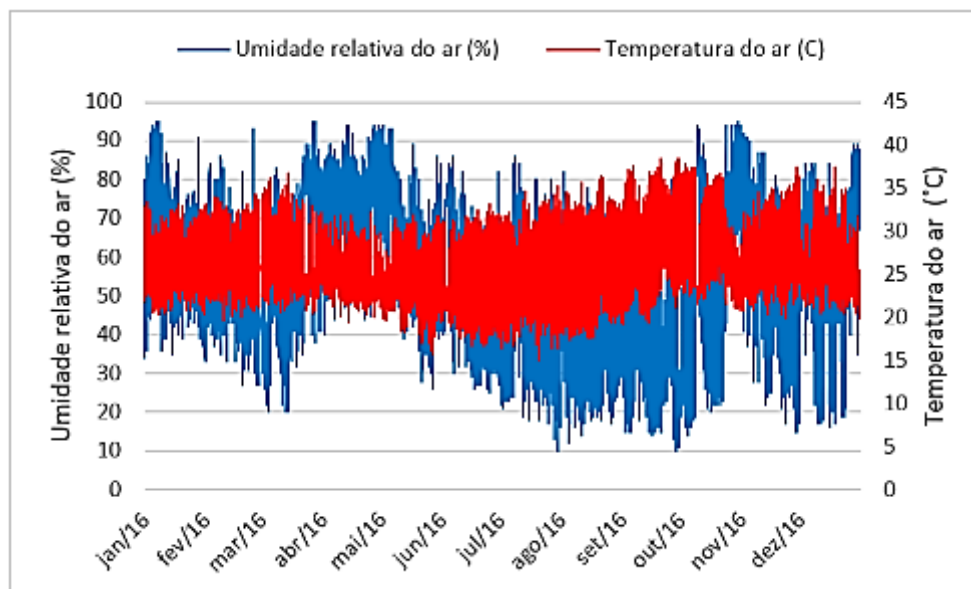


Fig. 19 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Bom Jesus da Lapa [110]

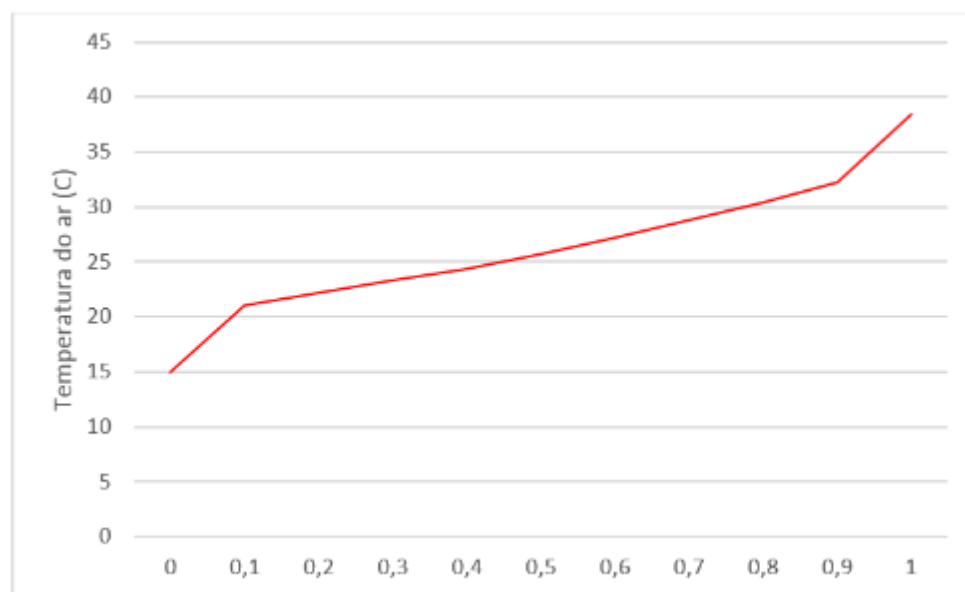


Fig. 20 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Bom Jesus da Lapa

Zona Bioclimática 7-[ZB7]

Para a ZB7, as construções, segundo a NBR 15220-3 devem ser priorizados projetos que envolvam edifícios com aberturas pequenas para a ventilação, deve-se sombrear essas aberturas, as vedações externas cobertura e paredes segundo a normativa devem ser pesadas, e deve-se adotar estratégias de condicionamento térmico através do resfriamento evaporativo e ventilação deve ser seletiva seletiva, sempre que a temperatura interna seja superior à externa [42].

Dados de temperatura e umidade relativa do ar de cidades que compõem a zona bioclimática 7, a exemplo de Petrolina, no estado de Pernambuco, local de estudo do protótipo, são apresentados nos gráficos das Fig. 21 e Fig. 22.

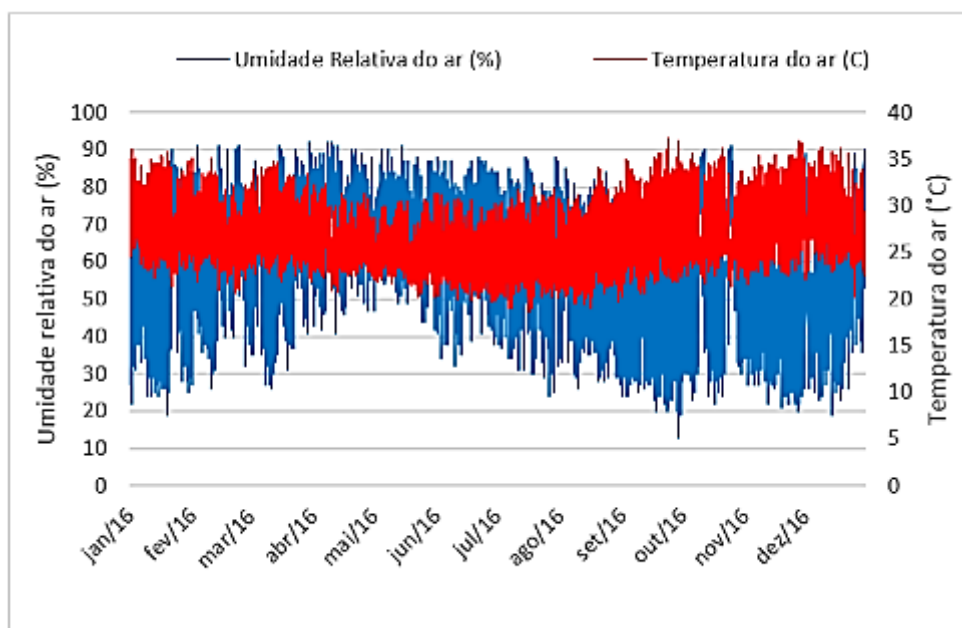


Fig. 21 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Petrolina [110]

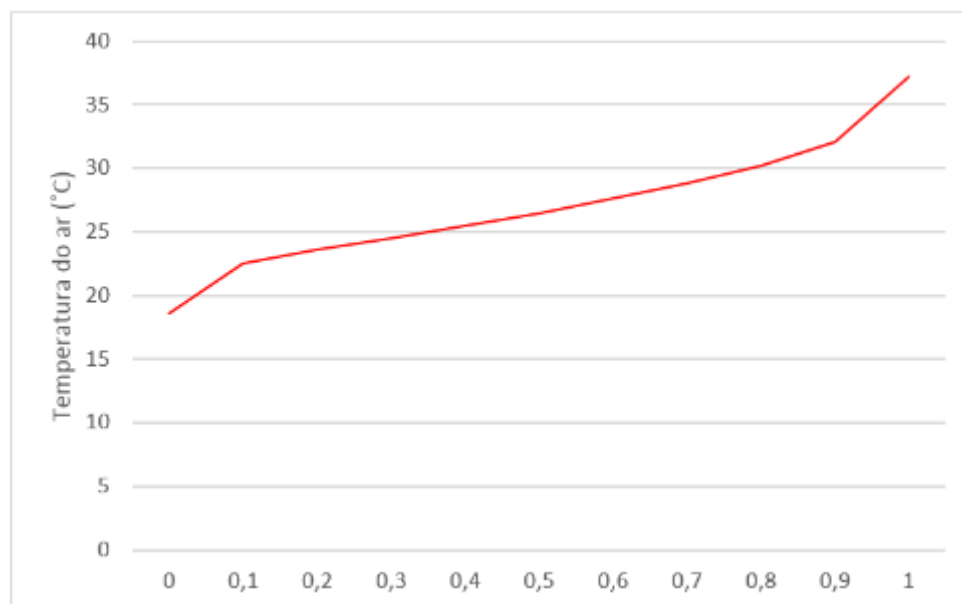


Fig. 22 - Probabilidade Acumulada Para Petrolina

O resfriamento evaporativo indicado como estratégia climática para esta ZB7 tem a capacidade de reduzir a temperatura e aumentar a umidade relativa de um ambiente.

Embora de pouco uso no Brasil, os sistemas de resfriamento evaporativo possuem grande potencial para propiciar conforto térmico em locais onde a temperatura de bulbo úmido é relativamente baixa.

Zona Bioclimática 8-[ZB8]

Para a zona bioclimática 8 segundo a NBR 15220-3[42], as construções devem conter grandes aberturas para a ventilação, deve-se sombrear essas aberturas, possuir envolventes leves e refletoras e adotar estratégias de ventilação cruzada permanentemente no período de verão. A norma não prescreve qualquer tipo de sugestão de estratégia de condicionamento para a estação de inverno. Dados de temperatura e umidade relativa exterior de cidades que compõem a zona bioclimática 8, a exemplo da cidade de Recife-PE, permite serem analisados nos gráficos das Fig. 23 e Fig. 24.

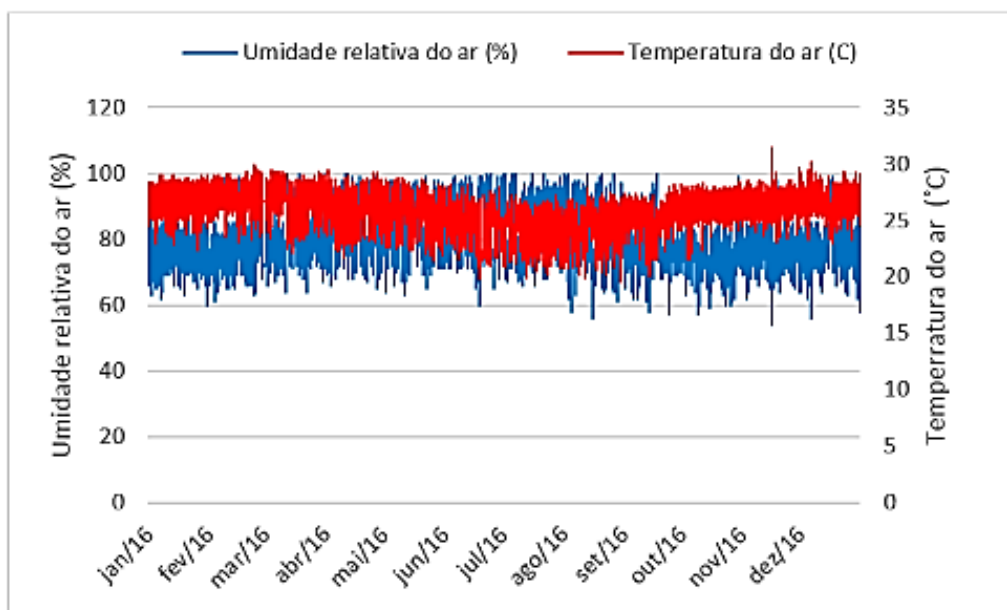


Fig. 23 - Variação de temperatura e umidade relativa exterior para a cidade de Recife [110]

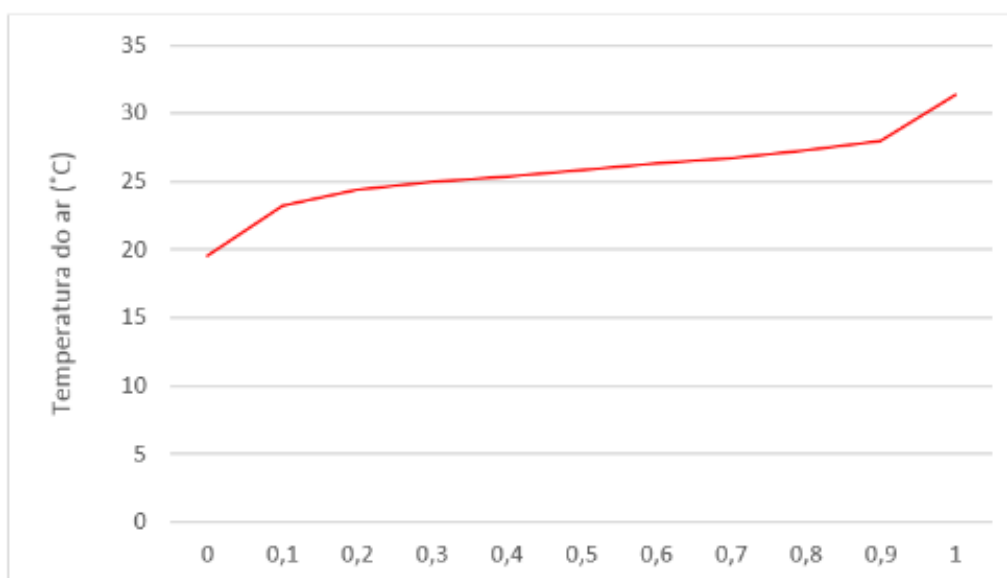


Fig. 24 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar para a cidade de Recife

Na Fig. 25 é apresentado um resumo das curvas de probabilidade acumulada representativa de 7 zonas bioclimáticas no Brasil. Nas curvas pode se perceber a variação de temperatura entre os climas predominantes no país.

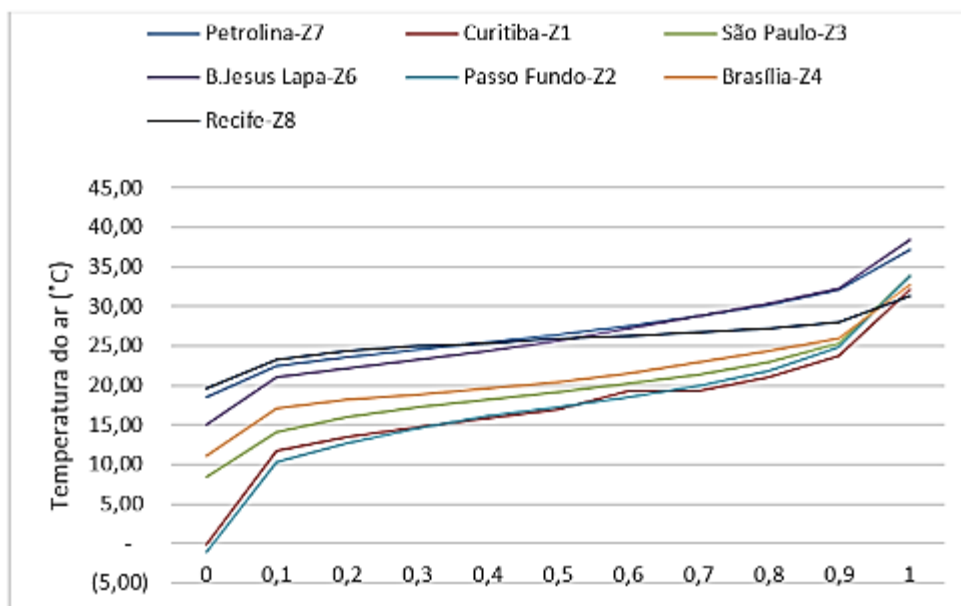


Fig. 25 - Curvas de probabilidade acumulada para 7 zonas bioclimáticas no Brasil

Segundo a NBR 15220-3[42], essas diretrizes são fixadas no sentido de orientar as construções de modo que as mesmas possam se adaptar e usufruir das condições do clima local.

As condições de conforto e consumo energético são variáveis dependentes, motivo pelo qual, se um edifício com suas características construtivas não está de certa forma adaptado às condições climáticas locais, não ofertará conforto e consequentemente implicará num consumo energético elevado.

2.3.1. SÍNTESE

Neste capítulo foi possível fazer uma explanação do zoneamento bioclimático brasileiro com as respectivas áreas de abrangência e percentual de abrangência de cada zona. Foram observadas as temperaturas do ar e umidade relativa do ar exterior nas oito cidades estudadas e representativas de cada uma dessas zonas bioclimáticas. Neste estudo, foi possível identificar em duas zonas bioclimáticas registros de temperaturas negativas, como se verificou para Curitiba na zona 1 e Passo Fundo na zona 2. Duas cidades em análise neste capítulo, Petrolina na zona bioclimática 7 e Bom Jesus da Lapa na zona 6 possuem curvas de temperatura muito semelhantes apesar de estarem em zonas diferentes. Essa análise pode indicar uma possível falha nos critérios de enquadramento da norma NBR 15220 para algumas cidades que se encontram em zonas bioclimáticas diferentes, mesmo possuindo características climáticas muito semelhantes.

No capítulo a seguir, passa-se expor uma explanação dos níveis normativos brasileiros relacionados ao desempenho térmico.

2.4. NÍVEIS NORMATIVOS DE DESEMPENHO TÉRMICO NO BRASIL

2.4.1. ABNT NBR 15.220 (2005) – DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Esta normatização foi publicada em 2005, constitui a norma de desempenho térmico de edificações, é dividida em 5 partes, a primeira trata das definições e simbologia, a segunda envolve a metodologia de cálculos de elementos e componentes das edificações. Na sua parte 3 é descrito o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, as diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento térmico para cada zona. As partes 4 e 5 tratam do método de medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente e protegida e fluxímetro.

A NBR 15220-3 [42] apresenta as diretrizes para o uso da ventilação em sete zonas bioclimáticas, não recomendando a ventilação apenas na zona 1, por tratar-se da região mais fria do país. A ventilação cruzada foi recomendada para as zonas bioclimáticas 2, 3 e 5, onde é possível manter o fluxo de ar através das aberturas, portas e janelas; a ventilação seletiva, recomendada para as zonas 4, 6 e 7, indicada nos períodos mais quentes ou quando a temperatura interna for superior à externa; e recomenda a ventilação permanente para a zona 8, justificando a necessidade de ventilação para a melhoria das condições térmicas internas dos edifícios.

2.4.2. ABNT NBR 15.575 (2013) - EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - DESEMPENHO

Essa norma foi sancionada em 2008 e na sua quarta edição publicada em 2013 prescreve as condições de habitabilidade para o alcance do conforto ambiental, através das condições mínimas de conforto térmico, lumínico, tátil, antropodinâmico, higrotérmico, visual e psicológico para o usuário. Tem entre seus objetivos, complementar e abranger os mais distintos setores da construção. A normativa prioriza as exigências dos usuários em relação à segurança, habitabilidade, sustentabilidade e níveis de desempenho para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao comportamento e uso, e não prescreve como os sistemas devem ser executados. [44].

É uma norma que pode ser considerada complementar, ao estabelecer que antes da sua aplicação, sejam consideradas inicialmente as exigências prescritas na NBR 15.220-3 [42], que considera as condições peculiares de condicionamento térmico da zona bioclimática específica, para o caso em análise. Está dividida em seis partes, assim descritas:

- Parte 1- Requisitos gerais;
- Parte 2- Requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3- Requisitos para os sistemas de piso;
- Parte 4- Requisitos para os sistemas de vedações internas e externas;
- Parte 5- Requisitos para os sistemas de cobertura;
- Parte 6- Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

A NBR 15575 (44) desde que foi sancionada apresenta dois procedimentos para avaliar o desempenho térmico de edificações, e que foi mantido na sua última versão em 2013. Um primeiro procedimento analisa a edificação na fase de projeto por meio de simulação computacional, um outro, avalia a edificação já executada, por meio de medições in loco. Nesta Tese, o procedimento utilizado para analisar o desempenho térmico da casa de gesso foi a análise da edificação em serviço por meio de medições dos parâmetros higrotérmicos no local, e posteriormente foi utilizado o segundo procedimento da norma, a simulação através do software WUFIPlus, disponibilizado pelo LFC da FEUP, em parceria com o Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), da Alemanha.

Na análise da avaliação do desempenho térmico, a NBR 15575 (2013) estabelece que sejam definidos os requisitos e critérios para os sistemas de vedação, cobertura e para o edifício como um todo.

Para a avaliação do desempenho térmico por simulação, a norma determina critérios para inserir a edificação analisada em três níveis de desempenho (nível mínimo, intermediário e superior), relacionando a temperatura interior com a temperatura exterior nas estações de inverno e verão, de acordo com a zona bioclimática na qual a edificação encontra-se inserida (Tabela 7).

Tabela 7 - Critérios de avaliação do desempenho térmico de inverno e verão (adaptado de NBR 15575)

Níveis de Desempenho NBR 15575						
Critério de Inverno				Critério de Verão		
Nível	Temperatura	Zonas de aplicação		Nível	Zona Z1 a Z7	Z8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ}\text{C})$	ZB 1 a ZB 5	ZB6 a ZB8 não se verificam estes critérios	M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^{\circ}\text{C})$			I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^{\circ}\text{C})$
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^{\circ}\text{C})$			S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^{\circ}\text{C})$

Níveis de desempenho: M-Mínimo, I-Intermediário, S-Superior

$T_{i,max}$ – Temperatura interior máxima diária em °C

$T_{i,min}$ – Temperatura interior mínima diária em °C

$T_{e,max}$ – Temperatura exterior máxima diária em °C

$T_{e,min}$ – Temperatura exterior mínima diária em °C

Em síntese, observa-se na Tabela 7, a não obrigatoriedade de se verificar o nível de desempenho térmico de uma edificação inserida nas ZB 6 a ZB8, no inverno, tornando essa obrigatoriedade apenas para a estação de verão. Este procedimento pode comprometer o nível de desempenho térmico de uma edificação inserida por exemplo na zona bioclimática 6 e uma outra na zona bioclimática 8 por estas duas zonas possuírem climas diferenciados e mesmo critério de análise de desempenho. Os critérios exigidos para a condição no verão, são diferenciados para classificar um edifício no nível superior da normativa, o que não acontece no inverno. Estas zonas apresentam situações climáticas diferentes, como é o caso de Bom Jesus da Lapa no Centro-Oeste baiano, inserido na zona 6, com altitude acima dos 400m, afastado 800 Km do litoral e a cidade de Recife, inserida na zona 8, no litoral de Pernambuco, com altitude de 4m, com temperaturas mais amenas que Bom Jesus da Lapa, ambas submetidas às mesmas condições de análise de inverno, quando se exige diferenças significativas no verão condicionando para essas cidades prescrições de estratégias de condicionamento térmico passivo diferenciados. Essas premissas condicionam a necessidade de uma revisão urgente da normativa.

2.4.3. RTQ-R (2012) – REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS UNIFAMILIARES E MULTIFAMILIARES

Sancionado em 2010, o RTQ-R [41] especifica requisitos técnicos e métodos para a classificação de edificações quanto à eficiência energética. Tem como objetivo a etiquetagem das edificações e analisa os requisitos relacionados à envoltória, sistema de iluminação, sistema de ar condicionado e a edificação como um todo. Estabelece diretrizes para o conforto térmico considerando principalmente a ventilação

através da área mínima de abertura em ambientes considerados de longa permanência, a considerar quartos, sala e cozinha.

Dentre outros aspectos, são definidas no RTQ-R ações relacionadas ao alcance do condicionamento térmico passivo, a exemplo da ventilação cruzada, controle de ventilação e demais dispositivos que determinam o nível mínimo de conforto e desempenho térmico das edificações. O regulamento considera como dispositivos, as venezianas móveis (estores), os peitoris ventilados (entradas de ar que condicionam a ventilação cruzada), as torres de vento (condutas de extração), bem como aberturas externas através de janelas e rasgos.

Em relação às aberturas e à ventilação natural, o RTQ-R [41] prevê percentuais mínimos de áreas para ventilação por zona bioclimática e determina a ventilação cruzada e permanente para sete das oito regiões do Brasil.

2.4.4. CONSIDERAÇÕES QUANTO À ABERTURA PARA VENTILAÇÃO VS. ÁREA DO PISO (%)

A NBR 15220-3 considera três dimensões de aberturas para ventilação nos edifícios: pequenas, médias e grandes aberturas, especificando os percentuais dessas aberturas enquadrando-as com a área do piso. A NBR 15575-4 [44] especifica valores mínimos de percentual dessas aberturas relacionados com a área do piso, fazendo valer sua aplicabilidade às oito zonas bioclimáticas e locais de aplicação segundo a norma.

Petrolina no estado de Pernambuco, região nordeste do Brasil e local de estudo do protótipo, situa-se na zona bioclimática 7, onde é previsto segundo a NBR 15220-3 [42], que as edificações tenham aberturas médias variando entre 15 e 25% da área do piso, relacionando com a área do ambiente em caso. Quanto ao prescrito na NBR 15575-4 [44], para o mesmo estudo desse ambiente, a norma prevê que essas aberturas sejam iguais ou superiores a 5%, na mesma zona bioclimática. Esses percentuais preconizados nas referidas normas podem ser vistos em resumo através do Tabela 8.

Tabela 8 - Percentuais limites de abertura para ventilação [42] e [44]

NBR 15220-3		NBR 15575-4		
Aberturas para ventilação	A (% da área de piso)	Zona	Locais	A (% área do Piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$	Z1 a Z6	Ambientes de Permanência prolongada e Cozinha	$A \geq 8\%$
Médias	$15\% < A < 25\%$	Z7		$A \geq 5\%$
Grandes	$A > 40\%$	Z8		$A \geq 10\%$

Em síntese, numa análise da Tabela 8, percebe-se uma maior flexibilidade da NBR 15575-4 [44] em relação à NBR 15220-3[42]. Os valores determinados pela primeira norma fazem referência apenas aos percentuais mínimos de aberturas, enquanto que a segunda normativa, prescreve para pequenas e médias aberturas percentuais limites, deixando fora as grandes aberturas, exigindo apenas um percentual mínimo, como também prevê a NBR 15220-3.

São prescritos os locais de aplicação dessas aberturas na NBR 15575-4, enquanto que a NBR 15220-3 não faz referência a locais de aplicabilidade da norma.

2.4.5. CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS LIMITES INDICADORES DE DESEMPENHO TÉRMICO DA ENVOLVENTE PARA A NBR 15220-3 E NBR 15575-5

Para o desempenho térmico da envolvente em projetos de edifícios é apresentado na Tabela 9 um comparativo entre o que preconiza a NBR 15220-3 [42] e a NBR 15575-5 [45] estabelecendo valores limites máximos e mínimos de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para cada caso da envolvente e suas aplicações às zonas Bioclimáticas.

Tabela 9 - Indicadores de desempenho térmico da envolvente [42] e [45]

ZONA	Paredes Externas					Coberturas				
	NBR 15220-3			NBR 15575-5		NBR 15220-3			NBR 15575-5	
	U	φ	FS ₀	U _{min}	CT min	U	φ	FS ₀	U	α
1	$\leq 3,00$	$\leq 4,3$	$\leq 5,0$	$\leq 2,5$	≥ 130	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$	-
	(leve)			(leve)		(leve isolada)				
2	$\leq 3,00$	$\leq 4,3$	$\leq 5,0$	$\leq 2,5$	≥ 130	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$	-
	(leve)			(leve)		(leve isolada)				
3	$\leq 3,60$	$\leq 4,3$	$\leq 4,0$	$\leq 3,7$ e $\alpha \leq 0,60$	≥ 130	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$
	(leve refletora)			$\leq 2,5$ e $\alpha > 0,60$		(leve isolada)			$\leq 1,50$	$\alpha > 0,6$
4	$\leq 2,20$	$\geq 6,5$	$\leq 3,5$	$\leq 3,7$ e $\alpha \leq 0,60$	≥ 130	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$
	(pesada)			$\leq 2,5$ e $\alpha > 0,60$		(leve isolada)			$\leq 1,50$	$\alpha > 0,6$
5	$\leq 3,60$	$\leq 4,3$	$\leq 4,0$	$\leq 3,7$ e $\alpha \leq 0,60$	≥ 130	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$
	(leve refletora)			$\leq 2,5$ e $\alpha > 0,60$		(leve isolada)			$\leq 1,50$	$\alpha > 0,6$
6	$\leq 2,20$	$\geq 6,5$	$\leq 3,5$	$\leq 3,7$ e $\alpha \leq 0,60$	≥ 130	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$
	(pesada)			$\leq 2,5$ e $\alpha > 0,60$		(leve isolada)			$\leq 1,50$	$\alpha > 0,6$
7	$\leq 2,20$	$\geq 6,5$	$\leq 3,5$	$\leq 3,7$ e $\alpha \leq 0,60$	≥ 130	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$ FV	$\alpha \leq 0,4$
	(pesada)			$\leq 2,5$ e $\alpha > 0,60$		(leve isolada)			$\leq 1,50$ FV	$\alpha > 0,4$
8	$\leq 3,60$	$\leq 4,3$	$\leq 4,0$	$\leq 3,7$ e $\alpha \leq 0,60$	Sem exigência	$\leq 2,00$	$\leq 3,3$	$\leq 6,5$	$\leq 2,30$ FV	$\alpha \leq 0,4$
	(leve refletora)			$\leq 2,5$ e $\alpha > 0,60$		(leve isolada)			$\leq 1,50$ FV	$\alpha > 0,4$

FV é fator de ventilação- estabelecido pela NBR 15220-2

FT é um fator de correção que admite transmitâncias mais altas em coberturas com áticos ventilados (ABNT, 1998).

U- Coeficientes de transmissão térmica de referência (W/m².°C) φ – Atraso térmico de componente (horas) α – absorvância à radiação solar da superfície externa da coberturaCT- Capacidade Térmica [KJ/m².K]FS₀ = g₁ - Fator Solar [%]

Para um melhor entendimento dos parâmetros térmicos comparados na avaliação da Tabela 9, convém esclarecer que o Fator de Ventilação (FV) que se faz referência, é um parâmetro estabelecido nas normas brasileiras NBR 15220-3 e NBR 15575-5 e seu cálculo se dá em função das dimensões das aberturas de ventilação contidas nos beirais, dado pela expressão:

$$FV = 1,17 - 1,07 \cdot h^{-1,04} \quad (1)$$

Onde:

h = altura da abertura em dois beirais opostos, em centímetros.

Obs: Para coberturas sem forro ou com áticos/desvão não ventilados, FV=1

A absorptância à radiação solar (α) é entendida como o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Essa radiação solar está concentrada na região do espectro eletromagnético compreendida entre um comprimento de onda de 0,2 μm e 3,0 μm . O atraso térmico (ϕ) compreende o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor e depende da capacidade térmica do componente construtivo e da ordem em que as camadas estão dispostas (NBR 15220).

2.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Efetua-se uma abordagem quanto à problemática do *déficit* habitacional brasileiro, projeção das demandas habitacionais, como se processou a política habitacional no Brasil após o ano de 2003, culminando com um estudo da política de promoção de casas pelo poder público nos últimos governos. Em uma segunda etapa, aborda-se a política energética no país, conflitando com o uso da energia no mundo, finalizando com uma abordagem do zoneamento bioclimático brasileiro, sua abrangência e seus diferentes climas predominantes. Neste capítulo foi possível expor como a legislação brasileira trata do estudo do desempenho térmico de edificações construídas no país. São apresentadas duas normas, a NBR 15220 que trata do zoneamento bioclimático do país e a NBR 15575, que faz referência ao desempenho térmico de edifícios residenciais unifamiliares e multifamiliares, além de um regulamento, o RTQ-R, cuja função está em complementar as duas normas no que se refere a questão da eficiência energética em edificações. O Brasil possui normas que tratam da questão de desempenho térmico e eficiência energética de forma incipiente, no entanto, mostra avanços na área, já havendo no país núcleos de estudos relacionados ao tema, a destacar os trabalhos produzidos em Santa Catarina pelo LABEEE da UFSC.

No capítulo a seguir, apresenta-se um estudo relacionado ao conforto térmico, suas metodologias e um estudo da ventilação noturna e suas contribuições para o conforto no Brasil e no mundo.

3.

CONFORTO TÉRMICO E VENTILAÇÃO NOTURNA

3.1. ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO

3.1.1. HISTÓRICO DE ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO

Registros de estudos do conforto em períodos anteriores a era cristã, destaca-se os estudos de Vitrúvio [60], século I a.C, que já à época fazia referência em seu tratado de arquitetura às considerações quanto ao clima em projetos de edifícios atribuindo referências aos locais salubres e orientação solar dos edifícios, configurando assim uma preocupação com o conforto térmico em edificações.

O conforto térmico vem sendo objeto de estudos ao longo de décadas por vários pesquisadores. Esses estudos com o enquadramento da pesquisa de diversos autores estão descritos na Tabela 10.

A adoção de um sistema passivo que possa ofertar conforto térmico a edifícios habitacionais e consumo energéticos mínimos, bem como manter a qualidade do ar interior satisfatório, torna-se fundamental para os usuários desses edifícios.

Peeters et al [46] afirma ser o conforto térmico o resultado de uma combinação dos parâmetros tanto do ambiente quanto do próprio corpo humano.

Conforme Nicol & Humphreys [48], o fato do clima interno ser aceitável em uma edificação, a torna confortável ao ponto de se poder projetar decisões futuras a respeito do seu consumo energético e garantia de sustentabilidade.

Tabela 10 - Cronologia de Estudos Nacionais e Internacionais de Conforto Térmico

Autor da Pesquisa (Ano)	Enquadramento da Pesquisa do autor
Houghten e Yaglou (1923) [50]	Determinaram a equação e zona de conforto térmico.
Fanger (1970) [51]	Voto Médio Estimado, PMV e a Percentagem de Pessoas Insatisfeitas; PPD.
Araújo (1996) [53]	Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares
Hackenberg (2000) [54]	Conforto e “stress” térmico em indústrias em adição.
Nicol e Humphreys (2001) [48]	Conforto térmico adaptativo e sustentável.
De Dear (2004) [49]	Aperfeiçoamento do modelo adaptativo de conforto térmico
Olessen e Parsons (2002) [52]	Confirmaram a validade da ISO 7730 somente em estudos de laboratório.
Gouvêa (2004) [55]	Conforto térmico em indústria de confecção.

Continuação da Tabela 10	
Gemelli (2009) [56]	Avaliação de conforto térmico, lumínico e acústico em escola.
Andreasi (2009) [57]	Avaliação do conforto térmico em região de clima quente e úmido no Brasil.
Lamberts e Xavier (2011) [58]	Reuniram as normas relativas a conforto e stress térmico, anteriores e atuais em um único documento.
Gagliano, <i>et al.</i> (2013) [59]	Estudaram a variabilidade do desempenho térmico de apartamentos em Porto-Portugal. Os autores avaliaram a influência de 4 variáveis no desempenho térmico em apartamento instrumentados em dois períodos, inverno e verão. No estudo, foi possível verificar a influência da ocupação na temperatura do ar interior. O efeito conclui sobre o comportamento da mediana variando entre 2.6°C e 2.9°C para apartamentos mais quentes e menos quentes.

3.1.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Com o objetivo de avaliar o efeito conjunto das variáveis envolvidas no conforto térmico, diferentes modelos são sugeridos por pesquisadores em todo o mundo.

Estes modelos são desenvolvidos levando em conta o desenvolvimento do tipo de atividade, vestimenta do indivíduo, para em seguida relacionar as variáveis do ambiente e reunir sob a forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos envolvidos diretamente em um determinado estudo.

A avaliação do conforto térmico na tese é estabelecida de acordo com a normalização vigente. Os modelos de conforto adaptativo existentes, estão especificados nas normas ASHRAE 55 [63] e EN 15251 [64]. A norma ISO 7730 [61] não contempla nenhum modelo específico para avaliação do conforto térmico adaptativo, no entanto no seu Capítulo 10, estabelece uma referência à possibilidade de aplicação de modelos adaptativos. A ISO 7730 reporta que através de estudos experimentais, os ocupantes dos edifícios suportam aceitar temperaturas do ar interior de valor superior às previstas pelo índice PMV de Fanger. Em Portugal, um modelo adaptativo desenvolvido no LNEC por Matias [47] define o conforto térmico em edifícios no país. No modelo do LNEC, o índice de conforto térmico determinado engloba a influência de parâmetros objetivos e subjetivos, obtidos em estudos de campo, complementados por tratamento de caráter sociológico.

Dentre os vários índices de conforto térmico encontrados, dois grupos de abordagens merecem destaque:

- Base no balanço de calor (PMV e PPD);
- Abordagem adaptativa.

3.1.3. FANGER (PMV/PPD)

Um modelo prescritivo de conforto térmico contempla espaços em que os ocupantes têm taxas metabólicas compreendidas entre 1.0 e 2.0 met, e vestuário com resistência térmica até 1,5 clo. Este modelo é descrito na norma EN 7730 [61] e tem base nos índices PMV e PPD de Fanger. No modelo, a norma prevê três classes de conforto térmico interior (A, B e C) com níveis de exigência que diminuem da classe A para a classe C. Na Tabela 11 são apresentados os valores de recomendações para cada classe levando-se em consideração um ambiente térmico aceitável para pelo menos 65% dos seus

ocupantes levando em consideração os índices PPD e PMV. São apresentados ainda especificações do perfil ocupacional dos espaços previstos e recomendados pela norma.

Tabela 11 - Classe de conforto prescrito pela norma [110]

Classe	Perfil de Ocupação Espacial	PPD [%]	PMV
A	Pessoas com necessidades especiais	< 6	-0,2 < PVM < 0,2
B	Edifícios novos ou sujeitos à reabilitação	< 10	-0,5 < PMV < 0,5
C	Edifícios já existentes	< 15	-0,7 < PMV < 0,7

3.1.4. ABORDAGEM ADAPTATIVA

Nos Capítulos 3.1.6, 3.1.7 e 3.1.8 apresenta-se uma breve descrição dos modelos de conforto térmico adaptativo que constam das normas ASHRAE 55 [63], EN 15251 [64], e do modelo disponibilizado pelo LNEC. [47]

São consideradas três formas de adaptação às condições ambientais na definição do modelo adaptativo (Brager G. e de Dear R.,[68] De Dear R., Brager G. e Cooper D.[69]. Essas adaptações de ordem comportamental, fisiológica e psicológica das condições ambientais podem ser vistas verificado os critérios adotados no estudo através da Tabela 12.

Tabela 12 - Condições ambientais no modelo adaptativo

ADAPTAÇÃO	CRITÉRIO ADOTADO
Comportamental	Ações tomadas por um usuário para garantir o equilíbrio térmico;
Fisiológica	Alterações nos mecanismos de trocas térmicas do indivíduo na busca de ajustar a resposta do organismo às condições ambientais;
Psicológicas	Alterações de percepção e reação aos estímulos sensoriais.

Os sistemas de climatização dos espaços oferecem um conjunto de possibilidades que permitem garantir as condições ótimas de conforto. A questão chave que se põe é a de obter, manter e controlar as condições de conforto fazendo uso racional da energia e otimizando os parâmetros que o influenciam. Esses parâmetros podem ser agrupados em três principais categorias:

- Parâmetros físicos: São relevantes a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a umidade relativa do ar, a velocidade relativa do ar interior;
- Parâmetros orgânicos ou subjetivos: Incluem-se nesta categoria, a idade, sexo, raça, cor ou outras características específicas dos indivíduos;
- Parâmetros externos: Incluem-se os níveis de atividade, que por sua vez relacionam-se com o metabolismo, o tipo de vestuário e as condições sociais.

Dentre estes, os parâmetros que mais influenciam o conforto térmico podem ser descritos como a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar, o vestuário e a atividade metabólica do indivíduo.

3.1.5. QUANTIFICAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

No processo de quantificação do conforto térmico, há uma relação de interdependência em quantificar alguns fatores de ordem comportamental, física e psicológica, cuja inexatidão destes, implica também em dificuldades no dimensionamento do conforto.

A idéia geral de conforto térmico tem base no conceito de termorregulação humana, ou seja, na capacidade do ser humano em manter uma temperatura interior constante, concomitantemente às trocas térmicas entre o indivíduo e o meio.

Um método de quantificar o conforto térmico é apresentado num gráfico proposto pela norma ASHRAE 55 [63] (Fig. 26). Segundo a norma, as condições ambientais foram levantadas a partir de pesquisas em laboratório onde as análises estatísticas dos dados coletados permitiram determinar a porcentagem de pessoas em atividades leve, ou seja, em estado sedentário, típico de escritório, que estariam em estado de conforto térmico. Nessas condições é definida uma faixa de atividade metabólica entre 1.0 e 1.3 met e um isolamento térmico da vestimenta entre 0.5 para a estação de verão e 1.0 clo para a estação de inverno.

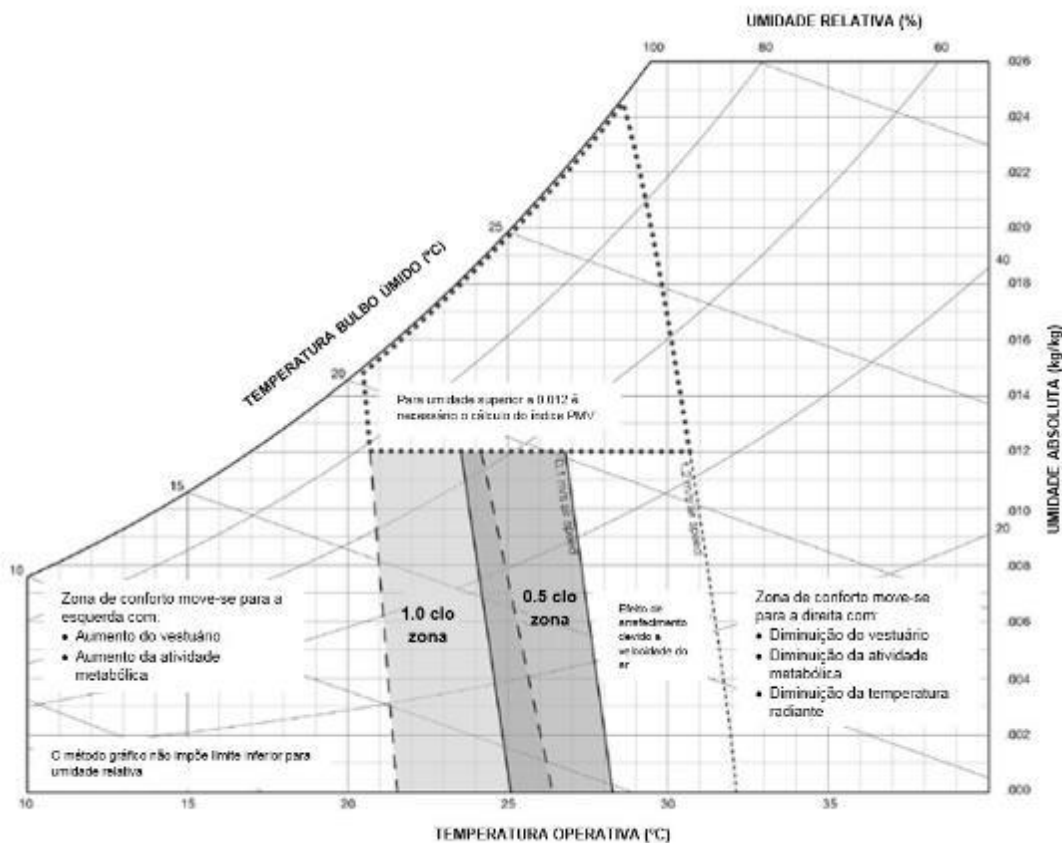


Fig. 26 - Zona de conforto térmico segundo a ASHRAE 55 [63]

Um terceiro modelo, o adaptativo, como acontece no modelo de previsão de conforto através do índice *PMV*, também está presente na mesma norma. O modelo introduzido é válido para ambientes sem meios mecânicos de arrefecimento do ar e prevê situação em que o utilizador tenha controle sobre a abertura de janelas.

3.1.6. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO – ASHRAE 55

A norma de conforto térmico ASHRAE 55[63] incorporou a abordagem adaptativa como critério de avaliação do desempenho térmico de edificações a partir das pesquisas realizadas pelo projeto ASHRAE RP-884. O modelo adaptativo leva em consideração duas classes de conforto correspondente a 80 % e 90 % de aceitação dos usuários (Fig. 27).

A zona de conforto correspondente a 80% de aceitabilidade, com uma largura de banda de $\pm 3,5$ °C em torno da temperatura operativa de conforto, sendo aplicável a situações correntes.

A zona de conforto correspondente a 90% de aceitabilidade, com uma largura de banda de $\pm 2,5$ °C em torno da temperatura operativa de conforto. Deve ser aplicada a edifícios onde se exige níveis elevados de conforto, sendo convenientemente aplicado a casos em que a temperatura média mensal exterior, $[T_m]$, tenha flutuação entre 10°C e 33.5°C, os edifícios utilizem a ventilação natural como forma passiva de controle térmico, sendo esta regulada pelas aberturas e fechamentos dos vão envidraçados pelos ocupantes, níveis de atividades metabólicas entre 1,0 e 1,3 met e facilidades em adaptações das peças de vestuário às condições do ambiente interior e exterior .

O modelo permite comparar a temperatura média mensal do ar exterior com a temperatura operativa interna.

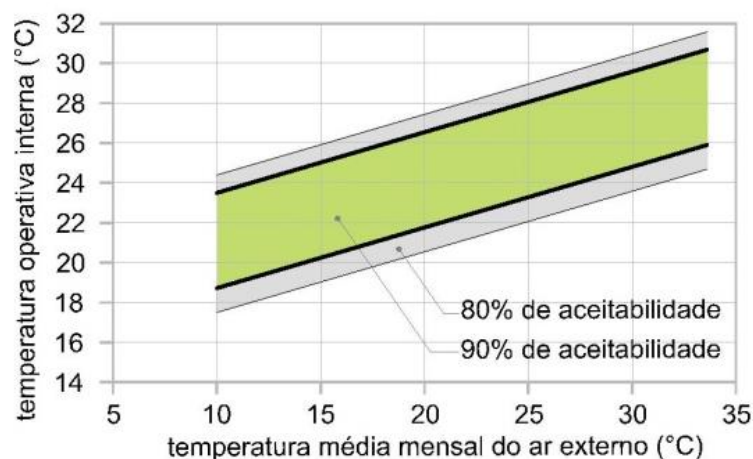


Fig. 27 - Método Adaptativo ASHRAE 55: Zona de Conforto para Edifícios Naturalmente Ventilados [80].

A expressão 2, expressa matematicamente a equação de regressão para o modelo proposto por Brager & de Dear [68] e define o cálculo da temperatura operativa de conforto $[T_{oc}]$ em função da temperatura média mensal exterior $[T_m]$:

$$T_{oc} = 17,8 + 0,31 \cdot T_m \quad (2)$$

Em que:

T_{oc} – Temperatura operativa de conforto [°C]

T_m - Temperatura média exterior [°C]

Segundo Nicol & Humphreys [91]; Tuner [92], a norma ASHRAE 55 [63] não especifica quantitativamente a temperatura média mensal presente na equação do cálculo da temperatura operativa de conforto (Toc), deixa no entanto, dúvidas se esta faz referência ao mês de calendário civil, aos últimos 30 dias ou a dados constantes das normais climatológicas.

A norma ASHRAE 55 [63] admite, de forma simplificada, a utilização da temperatura do ar interior (Ti), como aproximação da temperatura operativa de conforto, Toc, em se cumprindo as seguintes condições:

- Inexistência nos edifícios de painéis radiantes de aquecimento ou de arrefecimento;
- O fator solar dos envidraçados com valor inferior a 0,48;
- Inexistência de uma fonte de calor no compartimento analisado;
- O coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados e das paredes exteriores obedece à seguinte relação (Eq. 3):

$$Um < \frac{50}{td,i - td,e} \quad (3)$$

Em que:

Um: Valor médio entre o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado e da parede exterior - [W/m² °C]

td,i: Temperatura interior de dimensionamento - [°C]

td,e: Temperatura exterior de dimensionamento - [°C]

3.1.7. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO DA EN 15251

A EN 15251 [64] estabelece critérios avaliação da qualidade do ambiente interior nas edificações em três categorias, sendo a primeira categoria para alto nível de expectativa, que é recomendada para ambientes ocupados por pessoas sensíveis e frágeis; a segunda categoria para nível normal de expectativa, que deve ser utilizada para novas edificações; e a terceira categoria para nível moderado de expectativa, que deve ser adotada para edificações novas e existentes.

A norma inclui um método adaptativo para avaliar o conforto térmico cuja validação se dá no cumprimento das seguintes condições:

- Os edifícios devem estar isentos de equipamentos mecânicos de refrigeração, no entanto admite-se no verão meios passivos de arrefecimento, desde que os caudais de ventilação e os consumos sejam relativamente pequenos;
- Prioritariamente as aberturas e fechamentos de janelas sejam os meios condicionantes de controle da temperatura;
- As atividades metabólicas dos ocupantes devem apresentar níveis sedentários e variar entre 1,0 e 1,3 met;
- Admite-se um sistema de aquecimento, desde que neste não esteja incluso meios de ventilação mecânica de ar tratado;
- Não é permitido aos ocupantes estabelecer “regras” de ajustes dos vestuários ao seu metabolismo visando se adaptarem ao ambiente interior.

A EN 15251 [64] estabelece três faixas de temperaturas de conforto, sendo uma para cada nível de expectativa. As mesmas oscilam de 21,7°C a 30,7°C para aceitabilidade de 90%; de 20,35°C a 31,7°C para 80%; de 19,75°C a 32,7°C para 65% de aceitabilidade dos usuários, conforme a Fig. 28.

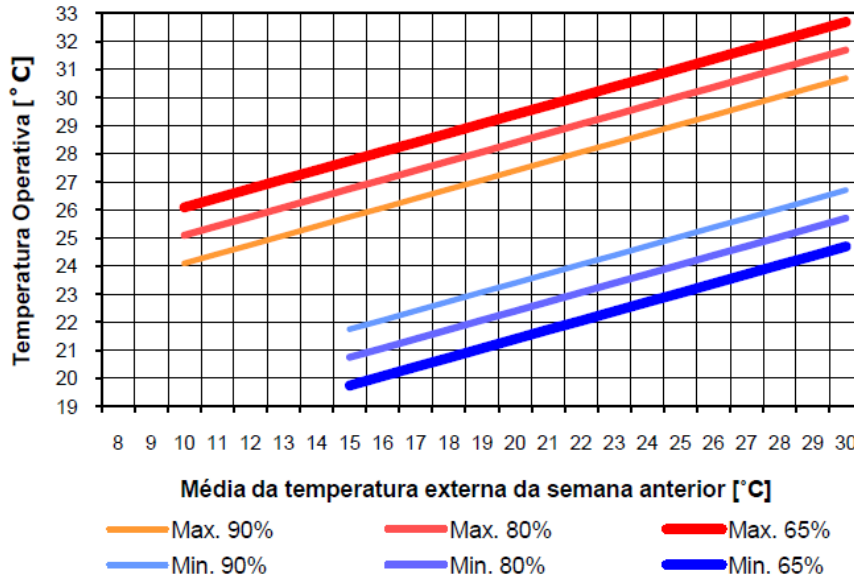


Fig. 28 - Diagrama de conforto térmico da EN 15251[64]

Na sua versão final, a norma EN 15251 [64] preconiza um modelo adaptativo inspirado nos resultados obtidos do projeto Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs) (McCartney, et al.,[66]; Nicol, et al.,[65]). O modelo adaptativo da norma EN 15251 (CEN, 2007) é válido para espaços sem limitação do número de ocupantes. A expressão adotada para o cálculo da temperatura operativa de conforto (T_{oc}), da referida norma, é estabelecida em função da temperatura média exterior ponderada, T_{mp} . A expressão no modelo adaptativo da EN 15251 [64] é traduzida pela Eq. 4:

$$T_{oc} = 0,33.T_{mp} + 18,8 \quad (4)$$

Em que:

T_{oc} : Temperatura operativa de conforto - [°C]

T_{mp} : Temperatura média exterior ponderada - [°C]

O cálculo para se obter a temperatura média exterior ponderada (T_{mp}) é estabelecido com base nos valores das temperaturas médias diárias da semana precedente, aplicando-se expressão da Equação 5 [80.4]; [80.1].

A utilização do valor temperatura média exterior ponderada (T_{mp}), adota como princípio que o intervalo de tempo característico para que o indivíduo possa se ajustar totalmente às alterações climáticas exteriores, seja de aproximadamente uma semana.

$$T_{mp} = \frac{(T_{n-1} + 0,8.T_{n-2} + 0,6.T_{n-3} + 0,5.T_{n-4} + 0,4.T_{n-5} + 0,3.T_{n-6} + 0,2.T_{n-7})}{3,8} \quad (5)$$

Em que:

T_{mp} : Temperatura média exterior ponderada - [°C]

T_{n-i} : Temperatura média exterior do dia (i) anterior - [°C]

Optou-se por não usar este modelo na Tese, mesmo observando-se uma certa similaridade ao modelo da norma ASHRAE 55, observando-se a condição de negatividade em deixar livre a escolha de um vestuário aos usuários que pudesse ofertar melhores condições de conforto térmico interior. Sendo assim, optou-se nesta Tese por um outro modelo.

3.1.8. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO PORTUGUÊS – LNEC

Um outro modelo adaptativo disponível para estudos, foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Portugal, para definição das condições de conforto térmico em edifícios. Neste modelo, o índice de conforto térmico determinado engloba a influência de parâmetros ambientais e os relativos à percepção térmica, obtidos com base em estudos de campo e complementados por tratamento de caráter sociológico.

O estudo foi desenvolvido por Matias [47], com suporte por medições “*in situ*” dos parâmetros de conforto térmico, e pela realização de inquéritos aos ocupantes para posterior validação dos resultados experimentais. No estudo foram definidas duas temperaturas de conforto, T_{conf} , obtidas em função da temperatura média exterior ponderada, T_{mp} , calculada com base na Equação 4.

As duas temperaturas de conforto dizem respeito a duas situações distintas:

- Edifícios com sistemas de climatização ativados;
- Edifícios não climatizados, por não possuírem qualquer tipo de sistema de climatização instalado, ou por os sistemas existentes se encontrarem desativados.

A Fig. 29 apresenta o gráfico comparativo da Temperatura exterior (°C) com a temperatura de conforto (°C) do modelo LNEC.

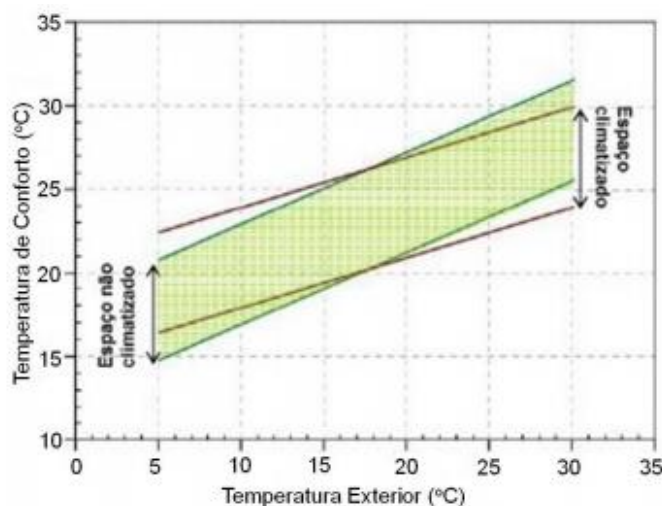


Fig. 29 - Valores recomendados da temperatura de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (adaptado de [53])

Segundo Almeida [86], o estudo desenvolvido por Matias [47] inclui uma zona de conforto para uma aceitabilidade de 90%, definida com uma largura de banda de ± 3 °C em torno da temperatura de conforto (Fig. 29). No gráfico é indicado, para espaços não climatizados, temperaturas limites no inverno

e no verão de, respectivamente, 15 °C e 31 °C. É evidente uma maior tolerância dos ocupantes aos limites extremos de conforto térmico nos edifícios não climatizados, comparando-se com os edifícios climatizados. De acordo com Matias [47], as temperaturas-limite indicadas só devem ser consideradas em ambientes interiores em que haja elevada possibilidade de adaptação, quer pelo lado pessoal, quer pelo ambiental, apenas disponível para edifícios residenciais.

No estudo de campo desenvolvidos por Matias [47] em edifícios de serviços e residenciais, visando avaliar as condições de conforto, foram envolvidos medições de vários parâmetros ambientais (interiores e exteriores), sendo estes, a temperatura do ar interior, (T_i) e a temperatura média radiante, (T_{mr}). A partir dessas temperaturas, foi possível estabelecer o cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} . No gráfico da Fig. 30 é apresentada a correlação obtida entre os valores médios da temperatura do ar interior, (T_i), e da temperatura operativa de conforto, (T_{oc}), para os estudos de campo desenvolvidos [47]. Os resultados revelam uma relação de dependência linear entre os dois parâmetros correlacionados (coeficiente linear de Pearson, $R=0,99$), e ratificam que, em situações correntes, é possível utilizar a temperatura do ar interior, (T_i) como uma boa aproximação da temperatura operativa de conforto, (T_{oc}).

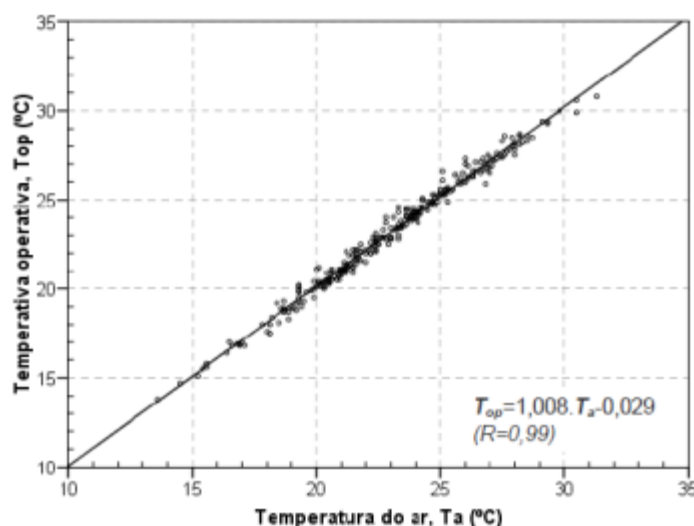


Fig. 30 - Correlação entre os valores médios das temperaturas do ar e operativa (adaptado de [53])

Optou-se por não utilizar nesta Tese o modelo adaptativo desenvolvido pelo LNEC. Os estudos de campo desenvolvidos por Matias [47] para avaliação das condições de conforto, incidiram em edifícios de serviços, como escritórios, escolas e lares de idosos, não se estendendo ao setor residencial, apenas para 4 edifícios multifamiliares de habitação. Por não ser um estudo diretamente atribuído em sua maior parte a edifícios de habitação, optou-se pela não utilização deste modelo.

3.1.9. MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADOTADO

O modelo de Fanger [51] é tido como um modelo que apresenta restrições quanto à sua aplicação em edifícios ventilados naturalmente e em climas tropicais.

Avaliar as edificações construídas com blocos de gesso no Brasil visando estudar o conforto térmico constitui um objetivo fundamental a alcançar nesta Tese, e terá como base o demonstrativo de resultados experimentais assim obtidos.

O modelo de conforto térmico escolhido para delinear este trabalho, será o método adaptativo prescrito pelas normas ASHRAE 55 e ISO 7730. O motivo da escolha tem como base o princípio de poder comparar a temperatura média mensal exterior com a temperatura operativa de conforto estabelecida pela ASHRAE 55. O edifício casa de gesso em estudo nesta Tese não possui meios de arrefecimento mecânicos, a temperatura média mensal exterior varia entre os 10°C e os 33.5°C, os ocupantes têm nível de atividades entre 1,0 e 1,3 met e podem adaptar seu vestuário às condições ambientais interiores e exteriores. Ênfase será dado à definição do perfil dos usuários, localização e condições em serviço da casa protótipo analisada. A temperatura operativa de conforto será calculada pela equação 2 da secção 3.1.6.

O modelo adaptativo da norma ASHRAE 55 foi utilizado em trabalho publicado em Portugal por Curado [70] nos calculos do conforto térmico de inverno e verão de um apartamento-tipo na cidade do Porto, tendo considerado uma classe de conforto de 80% dos ocupantes no estudo.

Na Tese foi utilizado o modelo adaptativo da norma ASHRAE 55 [63], para verificar o conforto térmico de verão e inverno. O estudo foi realizado em uma edificação construída em blocos de gesso na cidade de Petrolina, no Brasil, tendo considerado no estudo um nível de 90% de aceitabilidade pelos usuários. Este modelo faz parte da norma e considera 90% um nível de maior rigor quanto à exigência de conforto térmico.

3.2. VENTILAÇÃO NOTURNA

3.2.1. VENTILAÇÃO NATURAL COMO AGENTE DE CONTROLE DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR

A ventilação natural é traduzida como um mecanismo com capacidade de assegurar as condições necessárias e satisfatórias ao equilíbrio de agentes modificadores das qualidades ambientais a um custo reconhecidamente mínimo ou inexistente.

Gratia et al. [71] afirmam que em grande parte dos casos, a ventilação natural pode ser suficiente para assegurar conforto térmico em edifícios ocupados, com algum esforço em reduzir a geração de calor interno através de gestos pessoais e equipamentos bem escolhidos.

Por outro lado, estudos realizados por Santamouris [82] apontam que se pode tirar proveito do uso da ventilação natural nas condições térmicas interiores das habitações, aportando esses benefícios para um número além de 3 bilhões³ de pessoas no mundo, especialmente aquelas inseridas nas classes média e baixa.

De acordo com Schiffer e Frota [72], em países de clima quente e úmido, como é o caso do Brasil, a ventilação natural apresenta-se como uma alternativa passiva de baixo custo para os períodos em que o desconforto por calor seja evidente. A ventilação proporciona a sensação de conforto dos ocupantes de residências através do controle da velocidade do ar interno, respeitando limites de temperatura e umidade do ar.

A ventilação natural tem como estratégia segundo Mazon et. al [73], a regulação do clima interno de uma edificação por meio de uma troca de ar controlada pelas aberturas. O mecanismo de movimentação do ar para dentro e para fora de um edifício, de acordo com Hunziker [74] sob a ação das forças atmosféricas naturais, tem importância relevante para o estudo do conforto térmico dos usuários de edifícios.

³ Mil milhões.

3.2.2. VENTILAÇÃO NOTURNA COMO AGENTE NO ARREFECIMENTO DAS EDIFICAÇÕES

Um dos benefícios obtidos da ventilação noturna é a promoção do resfriamento do edifício retirando a carga térmica absorvida pelas construções em decorrência da exposição do edifício a radiação solar, bem como dos ganhos térmicos produzidos no interior das edificações face à presença dos usuários, funcionamento de equipamentos elétricos e de ganhos térmicos por iluminação artificial [62].

Nesses casos, altas taxas de ventilação tendem a propiciar temperaturas internas bem próximas das externas, removendo parte da carga térmica existente nos ambientes internos ([75], [76]).

Gratia et al. [71] e Andreasi [77] afirmam que a velocidade máxima aceitável em ambiente interno de 0.8 m/s, provoca a sensação de resfriamento em torno de 3°C. Essas sensações de resfriamento pela ventilação em velocidades de até 0,1 m/s só podem ser sentidas em temperaturas abaixo de 18°C, o que é indesejável. Sendo acima de 0.2 m/s, para o caso de temperaturas mais elevadas, é que se pode tirar proveito da sensação de resfriamento através da velocidade do ar passando pelo corpo.

Pesquisa realizada por Nicol [78] afirma que o benefício advindo da ventilação natural em regiões de clima tropical pode facultar temperaturas acima de 30°C como confortáveis, desde que no local onde se registre este valor, haja incremento com uso de ventiladores.

Dentre os fatores que permitem a tolerância a essa variação limite da temperatura na zona de conforto, estão os processos de adaptação do indivíduo ao meio e a mudança de local na tentativa de captar melhor a ventilação projetada pelos equipamentos. Essa capacidade de adaptação pode elevar a temperatura de conforto em 2 ou 3°C. A Fig. 31 mostra que o incremento na velocidade do ar em 1m/s é capaz de elevar a temperatura de conforto a valores superiores aos 3°C. Assim sendo, considera-se essencial o uso da ventilação natural no sentido de melhorar a sensação térmica dos usuários, mesmo em casos que a temperatura exterior supere os 29°C.

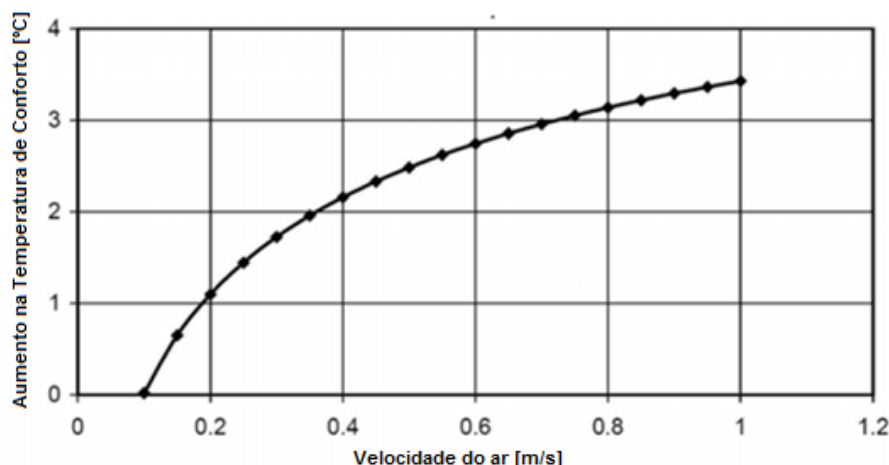


Fig. 31 - Influência do incremento da velocidade do ar na temperatura de conforto (adaptado [78])

3.2.3. CONTRIBUTOS INTERNACIONAIS NO ÂMBITO DA VENTILAÇÃO NOTURNA

Vários estudos internacionais têm justificado a eficiência do uso da ventilação noturna como forma eficaz e de baixo custo financeiro para os usuários de habitações. Alguns desses estudos são apresentados de forma sucinta na Tabela 13, por autor e local de desenvolvimento do estudo.

Tabela 13 - Contributos Internacionais Sobre Uso da Ventilação Noturna (adaptado de [70])

Autor/Ano	Local de estudo	Ventilação aplicada ao estudo	Contribuição do estudo
Givoni/2009 [79]	Sul da Califórnia-EUA	Noturna	Manutenção da temperatura interior abaixo dos 24,5°C, apesar da temperatura exterior ser de 38°C.
Artman et al./2006 [80]	Europa	Noturna	Provou no estudo a eficiência da ventilação noturna no verão em países do norte da Europa e Ilhas Britânicas. Essa eficiência, no entanto, diminui na Europa Central, de Leste, em Portugal, Espanha, Grécia e Turquia, mantendo um nível aceitável. Registra-se como exemplo, a cidade Lisboa, com duzentas noites por ano em que se considera o potencial de arrefecimento por ventilação noturna eficaz. Na referida cidade, em apenas 15 noites do ano o potencial de arrefecimento por ventilação noturna, não se traduz eficiente. Ainda no mesmo estudo, o Norte de Portugal é apontado como uma região com um forte potencial de ventilação noturna, comparado ao nível do Centro da Europa.
Shaviv et al./2001 [81]	Israel	Noturna	No estudo realizado pelos autores em 4 cidades de Israel avaliam a influência da inércia térmica e da ventilação noturna na temperatura máxima do ar interior, no verão, de um edifício de habitação. Foram levados em consideração no estudo 4 classes de inércia (leve, média, semipesada e pesada) e 4 níveis de ventilação noturna (sem ventilação noturna, ventilação natural com taxa de renovação horária de 5 h ⁻¹ e ventilação forçada com taxas de 20 Rph e 30 Rph). Os resultados apontam que quanto maior for a amplitude térmica diária local, maior redução da temperatura do ar interior, da mesma forma que quanto maior é a inércia térmica do edifício, analogamente, maior é a redução da temperatura do ar interior. O estudo aponta que num edifício com inércia térmica otimizada e com taxa de renovação de ar apropriada para a ventilação noturna é possível obter uma redução entre os 3 °C e 6 °C nos valores da temperatura do ar interior.
Santamouris et al./2010 [83]	Grécia	Noturna	O estudo dos autores avalia neste caso o impacto da ventilação nas necessidades energéticas em edifícios consoante a variação das taxas de ventilação e características dos edifícios. O estudo consta da monitorização de 214 edifícios de habitação na Grécia para avaliação do impacto da ventilação noturna nas necessidades energéticas de arrefecimento. Os resultados obtidos tornam evidentes que o impacto da ventilação noturna varia em função a taxa de renovação de ar adotada e das características construtivas dos edifícios monitorados. Em termos quantitativos, a introdução de ventilação noturna denota uma redução máxima das necessidades anuais de arrefecimento da ordem de 40 kWh/m ² , sendo o valor médio da redução anual igual a 12 kWh/m ² .

3.2.4. SÍNTESE

A tese desenvolvida estudou o conforto térmico e a ventilação noturna de uma casa construída em blocos de gesso na cidade de Petrolina. A situação sócioeconômica de uma boa parcela dos habitantes de classe média baixa no Brasil, sem hábitos de arrefecer as residências nas estações mais quentes e em quase todo o ano no país, pressupõe a importância de se adotar uma metodologia adaptativa na abordagem ao estudo do conforto térmico.

A casa em estudo nesta tese encontra-se em regime de livre flutuação de temperatura, para o qual, o conforto térmico interior está condicionado ao fato das pessoas de classe de renda menos abastecidas costumeiramente não arrefecerem as suas casas, e sendo este protótipo apresentado como uma possível solução construtiva visando minimizar a questão do déficit habitacional do Brasil, explorado no capítulo 2 neste documento.

Nos capítulos 3.1.6 a 3.1.8 apresentaram-se os modelos de conforto térmico adaptativos que constam das normas ASHRAE 55 [63], EN 15251 [64] e o modelo disponibilizado pelo LNEC [47]. Dos três modelos apresentados, foi utilizado o modelo adaptativo da ASHRAE 55, por estabelecer condições mais apropriadas ao estudo na casa de gesso no Brasil.

Por fim, será abordado no capítulo 7 um estudo da influência da ventilação noturna no conforto térmico e na eficiência energética da casa de gesso em 4 cidades brasileiras, a saber: Petrolina, Recife, São Paulo e Curitiba. A abordagem do estudo da influência da ventilação noturna no verão será explorada em três níveis de renovação de ar no período compreendido entre 21 e 6 horas da manhã, com valores de 1,5; 2 e 3 Rph.

O capítulo a seguir, faz uma abordagem da importância da produção de gesso no Brasil, sua aplicabilidade à construção civil, bem como exibe de forma sucinta um cenário da normatização internacional a respeito do produto gesso. No capítulo ainda descreve alguns aspectos de sustentabilidade das construções em gesso, embora não seja esse o assunto que constitui o eixo principal nesta tese.

4. IMPORTÂNCIA DA PRODUÇÃO GESSEIRA NO BRASIL E CASAS DE GESSO

4.1. HISTÓRICO DE CONSTRUÇÕES EM GESSO NO BRASIL

Segundo Pires Sobrinho [32], a vedação vertical interna com blocos de gesso não deve ser considerada inovação tecnológica no Brasil, já que há registros de casos em edifícios multipavimentos (acima de 12 pavimentos) com mais de 10 anos em Jaboatão do Guararapes-PE. Deve referir-se que vedação vertical com blocos de gesso está limitada aos estados da região Nordeste, mais especificamente nos estados de Pernambuco, Ceará e Sergipe.

Em Particular, o uso dos blocos de gesso na construção no Brasil ainda é um item restrito, devido à falta de conhecimento na tecnologia. Outro fator que restringe o uso dos blocos é a localização das jazidas de gipsita, material que dá origem ao gesso, que por estarem situadas a oeste do estado de Pernambuco, localiza-se distante dos grandes centros consumidores, potencialmente localizados na região sudeste do país. No entanto, o interesse no seu estudo é determinado pelo crescimento do consumo anual em torno de 8% ao ano no Brasil.

Embora se observe uma demanda crescente no uso dos blocos de gesso nas vedações internas em edifícios de múltiplos pavimentos, notadamente em grandes cidades do Nordeste brasileiro e até mesmo interior, há por outro lado um grande desconhecimento a respeito da sua tecnologia de produção, bem como do seu comportamento, ocasionado pela falta de normatização nacional, considerando-se fundamental a realização de pesquisas realizadas no Brasil sobre o assunto [33]. Há de se ressaltar a notoriedade na implantação prática de vedações com blocos de gesso no estado de Pernambuco em Recife, Trindade, Araripina e Petrolina, (Fig. 32), Belém do São Francisco (Fig. 33), Gravatá (Fig. 34). No estado do Ceará, obras de edifícios em Fortaleza (Fig. 35) e no Rio de Janeiro (Fig. 36).



Fig. 32 - Edifício de Múltiplos Pavimentos Construído em Gesso: Petrolina-PE



Fig. 33 - Edifício de Apartamentos construído em Gesso: Belém do São Francisco- PE



Fig. 34 - Casa de Gesso em Construção em Gravatá-PE



Fig. 35 - Edifício com paredes internas em blocos de gesso: Fortaleza. Fonte (Google)



Fig. 36 - Edifício com paredes internas e externas em blocos de gesso: Rio de Janeiro. Fonte:(Google)

4.2. IMPORTÂNCIA DA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA PRODUÇÃO GESSEIRA NO BRASIL

O Pólo Gesseiro do estado de Pernambuco está localizado no extremo oeste do Estado, denominada de Região do Araripe, distanciando-se cerca de 700 Km da capital Recife e neste mesmo raio das principais capitais do Nordeste. Abrange uma área total de 7.074,60 Km² (Fig. 37), com 235.446 habitantes. Fazem parte de sua composição os municípios de Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade [19]. Esse polo é responsável por aproximadamente 90% da produção nacional de gipsita e 81% da produção de gesso [23].

As jazidas da região do Araripe de acordo com Luz e Lins [24] são consideradas as de minério de melhor qualidade no mundo e apresentam excelentes condições de mineração.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/PE, o pólo industrial pernambucano é responsável por mais de 85% de toda produção da gipsita brasileira [21].

No Brasil conforme Mancino [25] existem grandes reservas de gesso de alta pureza com 95% desses depósitos concentrados a noroeste do estado de Pernambuco e que parte deste gesso é utilizado para a indústria dental, ortopédica e de construção.

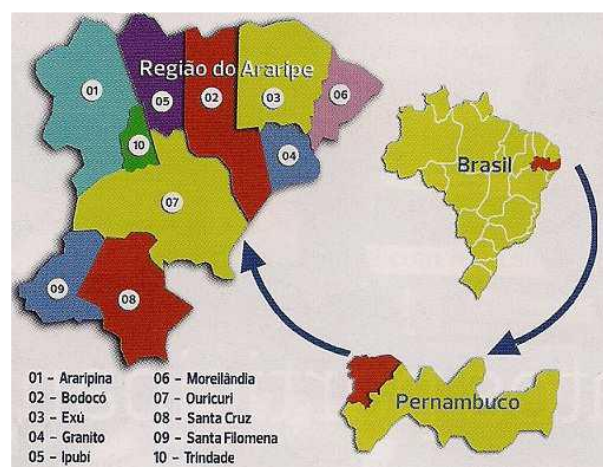


Fig. 37 - Localização geográfica da região do Araripe [22]

4.3. IMPORTÂNCIA DA CONSTRUÇÃO EM GESSO NO NORDESTE DO BRASIL

A região Nordeste do Brasil segundo a FJP [2], apresenta elevado percentual relativo (91,3%) na questão deficitária habitacional do país. A modalidade construtiva usando o gesso, matéria-prima abundante no Brasil, surge como um incremento na construção civil, com potencial suficiente para atenuar esse déficit e tornar-se mais uma alternativa disponível no mercado brasileiro. Segundo o Sindicato das Indústrias do Gesso Pernambucano-SINDUSGESSO [22], Pernambuco, situado na região nordeste do Brasil, possui uma reserva de aproximadamente 1,2 bilhões (mil milhões) de toneladas com potencial de exploração por um período estimado em 500 anos. O Brasil apesar de possuir tamanha reserva do produto, segundo o sindicato, situa-se na 9ª posição no ranking mundial, possuindo consumo embrionário em relação a países destacados como grandes consumidores a exemplo de Canadá, Espanha e o Irã, cujos consumos “*per capita*” são da ordem de 315; 190 e 145 kg/habitante.ano, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 - Consumo “*Per capita*” de gesso mundial (2005) [22]

Países	Consumo “ <i>per capita</i> ” [Kg]	Posição Mundial
Canadá	315,6	1
Espanha	189,3	2
Irã	145,9	3
Tailândia	82,1	4
Estados Unidos	81,1	5
França	76,4	6
México	71,8	7
Japão	43,4	8
Brasil	13,0	9
China	7,0	10

No Brasil, o processo construtivo em gesso apesar de apresentar características também embrionárias, vem crescendo, embora de forma desordenada, orfão de uma legislação nacional pertinente ao tema. [26]

Segundo Pires Sobrinho et al [26], alguns benefícios iniciais são obtidos numa obra envolvendo gesso. O autor constatou na pesquisa, uma redução a níveis de custo de obra, de sobrecarga e tempo de execução, minimizando de forma eficiente em todo um contexto geral. O gesso brasileiro pelas características apresentadas por Santos [27], em pesquisa no Laboratório de Física das Construções (LFC) da FEUP em Portugal, tem mostrado boa capacidade construtiva do ponto de vista do comportamento térmico por tratar-se de um material de baixo coeficiente de condutibilidade térmica ($\lambda=0,28 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$), importante para emprego em países de clima quente. Agrega possibilidades de quando moldado, constituir um material de grande interesse para uso em obras de construção civil em geral.

4.4. ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO EM GESSO

Resultados de estudos realizados por Pires Sobrinho et al [26] demonstram alguns benefícios obtidos em edifícios construídos internamente com alvenaria de gesso, quando comparado a alvenaria convencional de tijolos (Tabela 15). No estudo apresentado é estabelecido um comparativo entre o custo de armaduras, volume de concreto aplicado por tipo de obra e carga na fundação do edifício. A tipologia adotada, 6 (parede de tijolos); 6G (paredes de gesso); 14 (paredes de tijolos); 14G (parede de gesso); 22 (paredes de tijolos) e 22G (paredes de gesso) faz referência a edifícios de 6;14 e 22 pavimentos.

Segundo os autores, a análise de custos levantados foi efetuada com base nos valores praticados pela planilha de referência em custos oficiais públicos da Empresa de Limpeza Urbana do Recife (EMLURB Jan/2009), órgão da Prefeitura da Cidade do Recife, no estado de Pernambuco.

Tabela 15 - Comparativo financeiro e percentual: alvenaria de gesso VS. alvenaria de tijolos [26]

Tipo	Armadura nas Estruturas			Concreto nas Fundações			Carga nas Fundações	
	[Ton]	R\$	%	[m³]	R\$	%	[Ton]	%
6	17	110.500		41,9	50.280		1.386	
6G	15	97.500	-11,8%	30,9	37.080	-35,6%	1.158	-16,4%
14	55	357.500		166,02	199.224		3.927	
14G	49	318.500	-12,2%	125,79	150.948	-32,0%	3.315	-15,6%
22	114	741.000		322,96	387.552		6.282	
22G	101	656.500	-11,4%	244,62	293.544	-32,0%	5.309	-15,5%

É perceptível na análise de valores apresentados, uma redução nos custos financeiros nas armaduras estruturais, de percentuais variando entre 11,4% a 12,2%; valores da ordem de 32% a 35,6% no volume de concreto das fundações, culminando ainda com 15,5% a 16,4% de redução de cargas nas respectivas fundações, fatores de extrema relevância para a engenharia.

Na questão energética, estudos de Abeysundara et al [28] afirmam ser a energia incorporada uma forma de mensurar o impacto ambiental das construções, sendo este um indicador de sustentabilidade das edificações. Este cálculo contabiliza toda a energia utilizada na fabricação, transporte e utilização do material na construção.

Na Tabela 16 é apresentado um estudo realizado por Tavares [29], que mostram uma análise comparativa da estimativa da energia incorporada levando-se em consideração a armadura da superestrutura, volume de concreto da fundação e alvenaria interna dos apartamentos, para as edificações dimensionadas com 6, 14 e 22 pavimentos, com paredes em gesso (G) e de tijolos cerâmicos, construída com base nos valores unitários de Energia Incorporada, cujos resultados podem ser apreciados.

Tabela 16 - Dados Comparativos em função da estimativa energética Incorporada [29]

Tipo	Armadura Superestrutura			Concreto Fundações			Alvenaria Interna			Totalização	
	Peso [T]	EE[MJ]	%	Vol [m ³]	EE[MJ]	%	Peso [T]	EE[MJ]	%	EE[MJ]	%
6	17	510.000		41,9	311.736		434,88	1.100		822.836	
6G	15	450.000	-11,8	30,9	229.896	-26,3	300,24	975	-11,4	680.871	-17,3
14	55	1.650.000		166,02	1.235.189		1.014,72	2.567		2.887.756	
14G	49	1.470.000	-10,9	125,79	935.878	-24,4	700,56	2.275	-11,4	2.408.153	-16,6
22	114	3.420.000		322,96	2.402.822		1.594,56	4.034		5.826.857	
22G	101	3.030.000	-11,4	244,62	1.819.973	-24,3	1.100,88	3.575	-11,4	4.853.548	-16,7

As construções utilizando blocos de gesso, pelo exposto no estudo, contabilizam taxas de redução energética da ordem de 16,6% a 17,3% em relação à modalidade construtiva com blocos cerâmicos, atingindo maiores benefícios para obras de até seis pavimentos, no que se refere à estrutura do edifício.

4.5. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONSTRUÇÕES EM GESSO NO NORDESTE BRASILEIRO

Apesar do estudo da durabilidade das edificações construídas em gesso não ser o objetivo principal desta tese, dedica-se aqui um subcapítulo para apresentar em detalhes algumas dessas construções.

A Fig. 38 mostra um protótipo construído em gesso para estudos nas instalações do ITEP – Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco com 8 (oito) anos de construção. Vale ressaltar que as patologias oriundas da utilização e exposição do protótipo às condições naturais de intempéries resultam em descolamento de molduras em gesso colados na demarcação das janelas e destacamento de pinturas na superfície inferior, mais precisamente a uma altura de 50 cm do solo, cuja origem se deve a respingos de água de chuva, segundo relatos de técnicos do órgão de pesquisa.



Fig. 38 – Protótipo construído em gesso no ITEP com 8 anos (Fonte:ITEP,2015)

Devem ser efetuados estudos de durabilidade para as construções em gesso, o que não foi feito no âmbito desta tese, por não constituir parte dos objetivos que foram delineados, e por este tipo de estudo não implicar alterações de comportamento higrotérmico que pudesse comprometer o desenvolvimento deste documento.

4.6. HISTÓRICO INTERNACIONAL DE CONSTRUÇÕES EM GESSO

Segundo Nohier [30], a idéia de fabricar elementos pré-fabricados de vedação com materiais à base de gesso para então executá-los, constituindo uma parede, surgiu com as primeiras utilizações do gesso. Escavações arqueológicas revelaram a utilização desse tipo de pré-fabricado na cidade de El Kowm, na Síria, no sexto milênio a.C., e em Paris no século III d.C.

Os egípcios, há cerca de 5000 anos, segundo Mancino [25] faziam a queima do gesso ao ar livre, transformando-o em um pó. Posteriormente misturavam esse pó com água para fazer uma ligação mineral cujo objetivo era o fabrico de blocos de construção. Esses blocos foram utilizados para construir os colossais monumentos egípcios, muito dos quais sobrevivem até hoje, como a magnífica *Esfinge* e o túmulo de *Tutankhamon*.

A fabricação de gesso era empírica e rudimentar, porém, *Lavoisier* em 1768, apresentou a Academia de Ciências Francesa com o primeiro estudo científico dos fenômenos que constituía a base da preparação do gesso.

Ainda segundo o autor, no Irã a aplicação mais comum de gesso é em argamassa, entretanto os blocos de gesso também são populares e usados para construir divisórias internas nas construções residenciais.

Na Europa, o uso do gesso na construção civil tornou-se bastante popular a partir do século XVIII. A utilização do gesso nessa época foi bastante generalizada na construção. Na França, do montante das construções existentes, 75% dos hotéis, a totalidade dos prédios públicos e populares realizados em panos de madeira e argamassa de gesso, as novas construções ou as reformas, cerca de 95% foram feitas em gesso.

Na Espanha segundo a ATEDY [31], o uso de gesso chegou através dos árabes, ficando evidências nas artes muçulmanas e mouras, especialmente em Aragão, Toledo e Sevilha. Portanto, pode-se afirmar que o gesso constitui um dos materiais de construção mais antigos do planeta. A história do bloco de gesso não é tão remota quanto à do gesso.

Nos Emirados Árabes Unidos também se fabrica os blocos de gesso para utilização em construções e já existem empresas que os produzem. Uma unidade de fabricação de blocos de gesso criada em 1978 em Abu Dhabi produz atualmente 100.000 m² / dia, segundo Mancino [25].

Países como Espanha, França e Estados Unidos utilizam em larga escala tecnologias construtivas com o gesso, nomeadamente na execução de vedações internas, forros e revestimentos. É atribuído à França a origem e o desenvolvimento da tecnologia das vedações verticais com blocos de gesso.

Hoje, as indústrias de gesso francesas representam cerca de 95% da produção do país de todos os produtos da construção e aproximadamente 95% do volume de negócios do mercado francês de gesso. Em 2005, o consumo da placa de gesso na França foi maior que 260 milhões de m², aproximadamente 4 m² por habitante. Além disso, a indústria de gesso francesa é líder na Europa [34].

Segundo a empresa Brazilian Gypsum [35], há estudos mercadológicos para levar adiante projetos residenciais construídos em gesso para países africanos, incluindo Moçambique e Angola. Uma demonstração de quatro habitações nesses países levou a uma comercialização de 600 casas. Em Manágua, capital da Nicarágua, outro país de clima quente e em desenvolvimento, foi implantado um projeto piloto com a construção de 20 mil unidades habitacionais de 40 a 60 metros quadrados feitos totalmente em gesso.

4.7. NORMATIZAÇÃO INTERNACIONAL SOBRE GESSO

De acordo com a AENOR, o Ministério do Desenvolvimento, no âmbito das suas competências, criou os Padrões de Tecnologia da Construção (NTE), que inclui, entre outros, as determinações sobre a qualidade dos parâmetros de projeto, construção, controle, avaliação e manutenção das unidades de trabalho envolvidas nos produtos derivados do gesso, tais como os relativos às vedações interiores e forros. (Tabela 17)

Tabela 17 - Normas Internacionais sobre Gesso e Bloco de Gesso

Norma	Ano	Origem	Diretriz da Norma
UNE EN 12859 [36]	2008	Espanha	<i>Gypsum blocks - Definitions, requirements and test methods</i>
UNE EN 12860 [37]	2007	Espanha	<i>Gypsum based adhesives for gypsum blocks - Definitions, requirements and test methods;</i>
UNE EN 15318 [38]	2007	Espanha	<i>Design and application of gypsum blocks</i>
UNE EN 13279 – 1 [39]	2008	Espanha	<i>Gypsum binders and gypsum plasters</i>
P72-202 [40]	1994	França	<i>Ouvrages verticaux de plâtrerie ne nécessitant pas l'application d'un enduit au plâtre - Exécution des cloisons en carreaux de plâtre"</i>

Na Espanha os selos que atestam qualidades reconhecidas para estes produtos são segundo a associação ATEDY, 2009:

- Selo INCE, garante a qualidade do gesso e seus derivados e já são vinculados à AENOR;
- AENOR, cuja gestão está confiada à Comissão Técnica de Certificação AEN / CTC-035 "gessos de construção seus pré-fabricados e produtos relacionados, cuja secretaria é mantida pela ATEDY.

4.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Em suma, este capítulo possibilitou fazer um estudo exploratório a cerca das construções em gesso no Brasil e no mundo. Foi possível perceber um avanço desse tipo de construção principalmente na região Nordeste do Brasil, especialmente nos estados de Pernambuco, Ceará e Sergipe. Apesar de ser um material construtivo de grande importância do ponto de vista da sustentabilidade, bem como da questão energética, o Brasil ainda comporta-se como consumidor embrionário face aos registros de consumos em países como Canadá e Espanha. A questão durabilidade, abordada neste capítulo, constitui um aspecto fundamental para estudo, não sendo explorada nesta Tese por não agrupar dados que pudesse interferir no estudos propostos nos objetivos, ficando como um tema a ser explorado em estudos futuros.

O capítulo a seguir trata da caracterização experimental da casa de gesso em serviço.

5. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA CASA DE GESSO-TIPO EM SERVIÇO

5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A caracterização experimental do comportamento da casa de gesso é um dos objetivos fundamentais da Tese. A campanha experimental de medição dos parâmetros higrotérmicos visou avaliar o desempenho real de uma residência tipo, em condições de serviço, construída em blocos de gesso.

Os resultados dessa campanha experimental foram fundamentais para a validação do modelo computacional selecionado para a simulação dinâmica do desempenho higrotérmico do edifício em estudo, bem como foi base para o estudo de sensibilidade desenvolvido no Capítulo 7.

A metodologia proposta para as medições consistiu na monitorização em contínuo ao longo de um período de 1 ano completo (8760 horas), dos parâmetros físicos temperatura e umidade relativa do ar interior e exterior através de sensores colocados nos compartimentos e fora do edifício em estudo.

No Brasil, os dados meteorológicos existentes, geralmente não são tratados em sua maioria para a solução de problemas de projetos de edifícios, em muitos casos para uso na agricultura, dificultando de certa forma a atuação de profissionais da área de projetos e o desenvolvimento de pesquisas nesta área.

Na elaboração da Tese, os dados climáticos medidos “*in situ*”, conjuntamente com dados climáticos da estação meteorológica do INMET e do LABEEE da UFSC, foram fundamentais para validar o programa de simulação WUFI Plus e estudar o conforto térmico e a eficiência energética do protótipo em escala real construído em blocos de gesso na cidade de Petrolina-PE, região Nordeste do Brasil.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO TIPO EM ESTUDO

5.2.1. LOCALIZAÇÃO DA CASA DE GESSO

Na Fig. 39 localiza-se o edifício em estudo face ao norte geográfico.



Fig. 39 - Localização do Protótipo no sítio urbano

O edifício que está sendo monitorado é uma residência unifamiliar construída em blocos de gesso, localizada na zona urbana da cidade de Petrolina, que fica situada na região do semiárido do Nordeste brasileiro, às margens do Rio São Francisco, extremo oeste de Pernambuco e à norte do estado da Bahia. A cidade caracteriza-se basicamente pelo regime de chuvas escassas com média anual de 521,5mm, clima segundo a classificação de Koppen [105] do tipo BSw_h, ou seja, seco (Figura 35).

Predomina na região a vegetação xerófila, apresenta temperatura elevada, média anual 26°C. A temperatura no mês mais frio em média supera os 18°C. [107]

A Fig. 40 mostra a localização geográfica da área estudada.



Fig. 40 - Localização geográfica da área de estudo (Fonte: Google maps).

5.2.2. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DE PETROLINA

Tabela 18 apresenta os principais aspectos fisiográficos da cidade de Petrolina, local de estudo da edificação casa de gesso.

Tabela 18 - Aspectos fisiográficos de Petrolina. (Adaptado de IBGE-2010)

ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	PETROLINA
Latitude	09°23'55" Sul
Longitude	40°30'03" Oeste
Altitude	376m
Área Territorial	4 561,8 Km ²
Área Urbana	55,0 Km ²
População	293 962 hab
Clima	Semiárido
Relevo	Plano
Vegetação	Caatinga

5.2.3. CARACTERIZAÇÃO E GEOMETRIA DA CASA DE GESSO

Contribuindo para um melhor entendimento da geometria da edificação em estudo, a Tabela 19 descreve o dimensionamento dos cômodos interiores do edifício-tipo. A Tabela 19 faz uma descrição sucinta dos materiais e componentes construtivos constantes da casa.

Tabela 19 - Dimensionamento interior dos cômodos do protótipo

Ambiente	Dimensões		Volume [m ³]
	Área [m ²]	Pé direito [m]	
Sala-cozinha-circulação	55,24	2,80	154,67
WC social	3,96		11,08
Dormitório 1	24,20		67,76
Dormitório 2	13,20		36,96
Dormitório 3	13,20		36,96
WC suíte	5,40		15,12
Área Total =115,36 m ²			Total=322,55 m ³

A Tabela 20 apresenta um detalhamento do material construtivo utilizado na construção da casa de gesso objeto de estudo nesta tese.

Tabela 20 - Detalhamento do Material Construtivo da Casa de Gesso no Brasil

Elemento	Descrição
Paredes Exteriores	Alvenaria em Blocos de Gesso maciço 100 mm ($U=1,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
Paredes Interiores	Alvenaria em Blocos de Gesso maciço 100 mm ($U=1,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
Teto	Forro com placas de gesso 60x60cm, espessura 3 cm. ($U=3,27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)
Envidraçado J1	Caixilharia em alumínio com vidro incolor temperado espessura 8 mm 100cm x 120cm. $U=5,24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Envidraçado J2	Caixilharia em alumínio com vidro simples 3mm. (60cm x 40cm) cm. $U=5,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Porta Exterior P1	Porta Exterior em vidro incolor temperado de espessura 10 mm medindo 1,20m x 2,10m $U=5,24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Porta Exterior P2	Porta em vidro temperado incolor, espessura 10 mm medindo 0,90m x 2,10m, montada em pinos metálicos. $U=5,24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Revestimento	Revestimento de gesso espessura 3 mm. (Regularização de superfície)
Pintura	Pintura com textura acrílica cor clara após base selante.

A Fig. 41 traduz a planta de arquitetura (Piso 0) do edifício tipo, bem como identifica os envidraçados janelas (J), portas (P) e o posicionamento dos sensores de medição de temperatura e umidade interior e exterior.

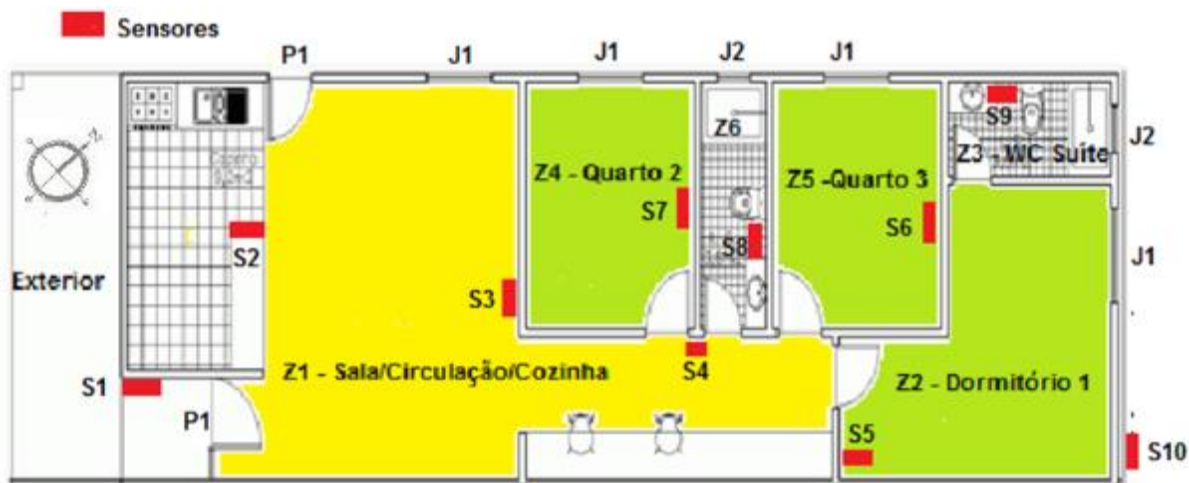


Fig. 41 - Planta com localização de janelas, portas e sensores instalados (piso 0)

A Fig. 42 mostra as fachadas (Alçados) Noroeste e Nordeste do edifício.

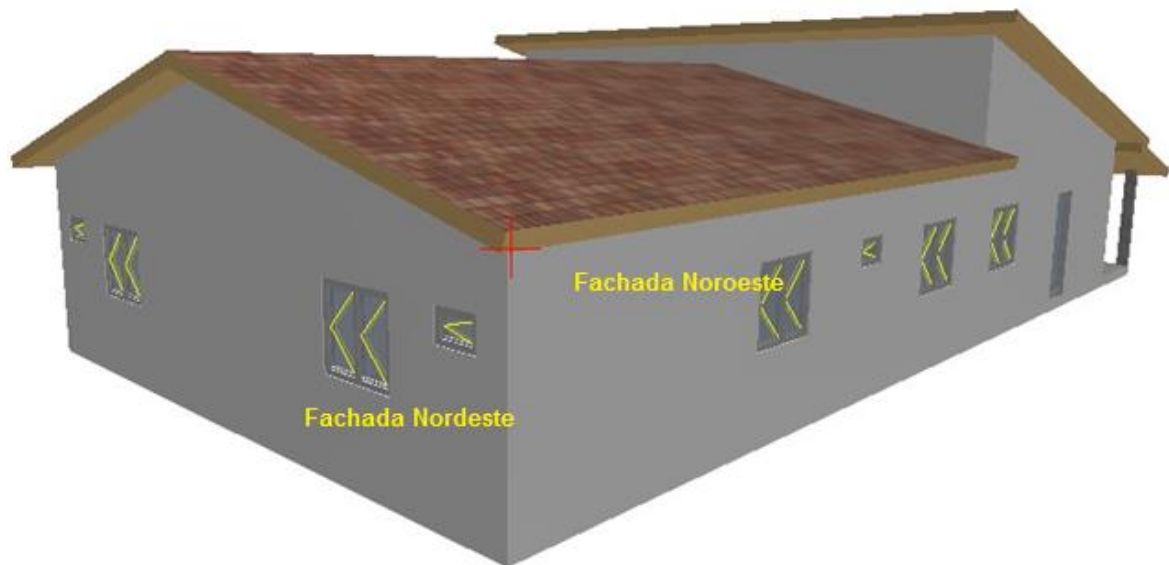


Fig. 42 – Visualização dos alçados Noroeste e Nordeste da casa de gesso.

Nas Fig. 43 a Fig. 45 são ilustrados detalhes interiores e exteriores do edifício em estudo.



Fig. 43 – Fachada Noroeste da edificação e vista interior da parede Noroeste



Fig. 44 – Envidraçado característico e fachada SW da edificação

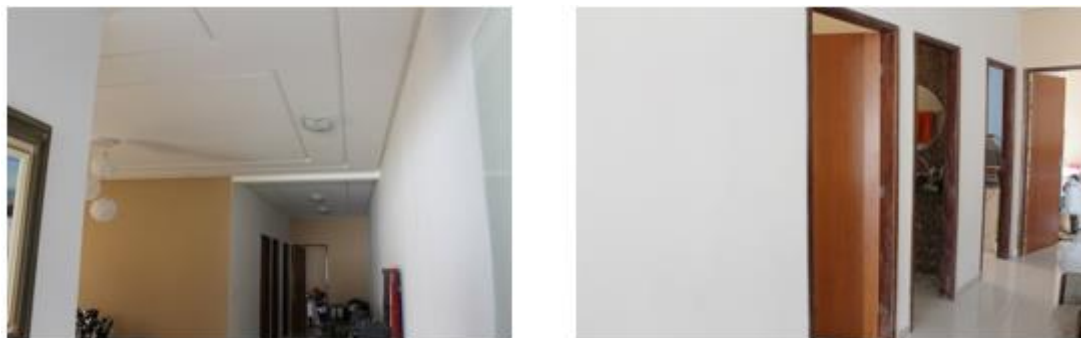


Fig. 45 - Detalhes interiores da casa de gesso – área de circulação

Informações da envoltória da casa protótipo em estudo podem ser visualizadas através da Tabela 21.

Tabela 21 - Caracterização de materiais e componentes construtivos da casa protótipo

	<p>Cobertura em telha cerâmica sobre madeiramento em contato com o exterior sem forro de gesso ou madeira. (Ático/desvão ventilado)</p>
	<p>Porta principal P1 (Fachada SW) em vidro temperado espessura 10mm.</p>
	<p>Envidraçado J1 (Fachada Noroeste) em vidro espessura 8mm caixilharia em alumínio, duas folhas (1 fixa e outra deslizante).</p>



Teto em forro de gesso espessura 3cm, suspenso por arame preso ao madeiramento da cobertura, sem isolamento sobre o teto

5.2.4. IMPLANTAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

Os sensores de medição em número de 10 unidades, nesta tese denominados (S1, S2,...S10), foram alocados nos cômodos da casa protótipo em locais previamente planejados com o objetivo de avaliar o desempenho higrotérmico da casa, visando medir o conforto interior e posteriormente validar o modelo de simulação em regime dinâmico. A Tabela 22 especifica os locais e alturas de instalação de cada sensor, tomando por base a cota do piso da casa. As Fig. 46 e Fig. 47 ilustram a localização dos sensores.

Tabela 22 - Localização Física dos Sensores de Medição de Temperatura e Umidade

Nº Sensor	Local	Altura do Sensor (m)
S1	Externo	1,80 (aproximadamente)
S2	Cozinha	
S3	Sala Estar	
S4	Circulação	
S5	Quarto 1 Suíte	
S6	Quarto 2	
S7	Quarto 3	
S8	WC social	
S9	WC Suíte	
S10	Externo 1	

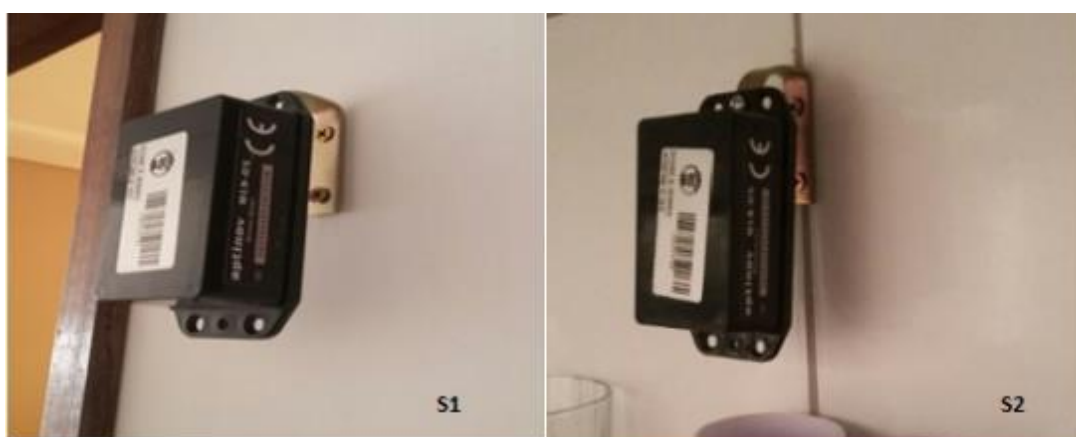


Fig. 46 - Sensor Externo e Cozinha

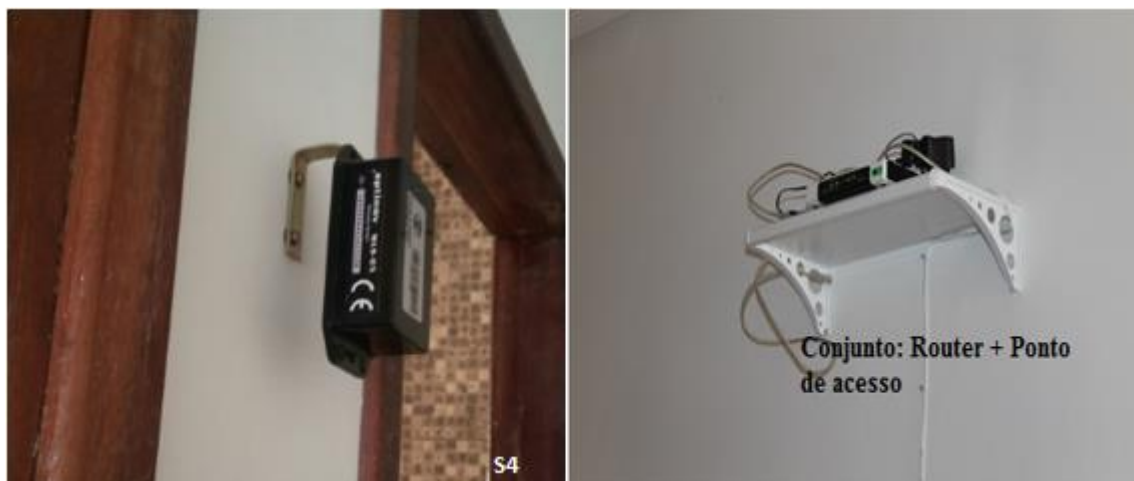


Fig. 47 - Sensor na Área de Circulação e conjunto router + ponto de acesso.

5.2.4.1. Procedimento metodológico de medição

As medições foram realizadas por um período contínuo de um ano e foi incluído ao equipamento de medição um recurso que permitia comunicar os dados via internet.

5.2.4.2. Identificação das zonas de medição e características dos sensores

A medição ocorreu no período do ano entre 1 de Janeiro de 2015 e 01 de Janeiro de 2016, de forma contínua, com medições espaçadas em intervalos de 10 minutos. Para identificar as zonas térmicas em que foi dividido o protótipo em estudo, definiu-se um código (Z1 a Z6), conforme representado na Fig. 48.

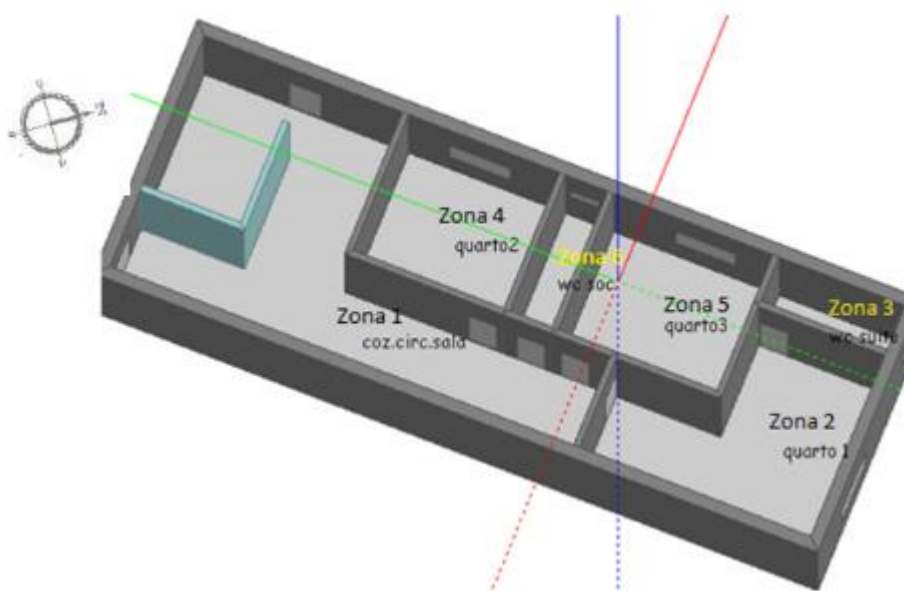


Fig. 48 - Identificação das Zonas Térmicas no Protótipo

Para as medições de temperatura e umidade relativa interior e exterior em contínuo, foram utilizados o equipamento termohigrômetro wireless WLS-05 (AptInov) sem fio (Fig. 49). Estes dispositivos garantem medições de temperaturas com espectro entre -40°C e 80°C , com uma precisão de erro de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de $0,01^{\circ}\text{C}$, e de umidade relativa com espectros de medição entre 0 e 100%, com uma precisão de erro de 3% e resolução de 0,1% [108]. Com o equipamento conseguiu-se um registro contínuo da temperatura e umidade relativa interior e exterior que foi utilizado para avaliar o desempenho térmico da casa de gesso.



Fig. 49 - Sensor Wireless WLS 05 [137]

Os termohigrômetros de medição utilizados nesta tese foram previamente calibrados pelo fabricante AptInov. [108]

As medições “*in situ*” da temperatura e da umidade relativa do ar serviram para caracterizar dois períodos primordiais no decorrer do desenvolvimento do trabalho de tese, relacionados por:

- Um período relativo à estação do Verão que compreende os meses de Janeiro a Maio e de Outubro a Dezembro;
- Outro período compreendendo os meses de Junho a Setembro, caracterizado como a estação do Inverno.

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.3.1. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR - INVERNO

A temperatura do ar é um dos parâmetros considerados como sendo de fundamental importância na avaliação do desempenho térmico de edifícios. Para avaliar o desempenho térmico da casa de gesso no Brasil efetuou-se uma campanha de monitorização experimental na estação do Inverno, correspondendo ao período de Junho de 2015 a Setembro de 2015. Efetuaram-se os registros de medições espaçados de 10 em 10 minutos ao longo de toda a estação, nos compartimentos sala, cozinha, três dormitórios e dois WC. (Ver Fig. 50)

Os dados de temperatura interior do protótipo foram obtidos em regime de livre flutuação da temperatura. A casa de gesso no período de monitorização esteve em serviço e ocupada por duas pessoas no período das 18 às 7 da manhã durante a semana e as 24 horas nos finais de semana. O controle de abertura das portas e janelas no período de monitorização foi efetuado pelos usuários. Não havia um controle de horário previamente acordado entre esse processo de abrir e fechar das portas e janelas. Segundo contatos com os moradores durante o período de monitorização, estes abriam as portas e janelas à medida que procuravam estabelecer uma situação mais agradável ao ambiente ao qual permaneciam por períodos mais prolongados, e assim os fechavam nos horários noturnos por questões de segurança.

Esta prática conduz a uma forte influência das temperaturas exteriores na temperatura interior do protótipo, tanto nos horários noturnos quanto diurnos.

Na Fig. 50 apresenta-se a curva de variação da temperatura do ar interior do protótipo ao longo dos meses da estação do Inverno em regime de livre flutuação.

Registra-se que ao se referir à temperatura interior da casa de gesso, estaremos referindo-se à média aritmética dos sensores internos instalados nos compartimentos.

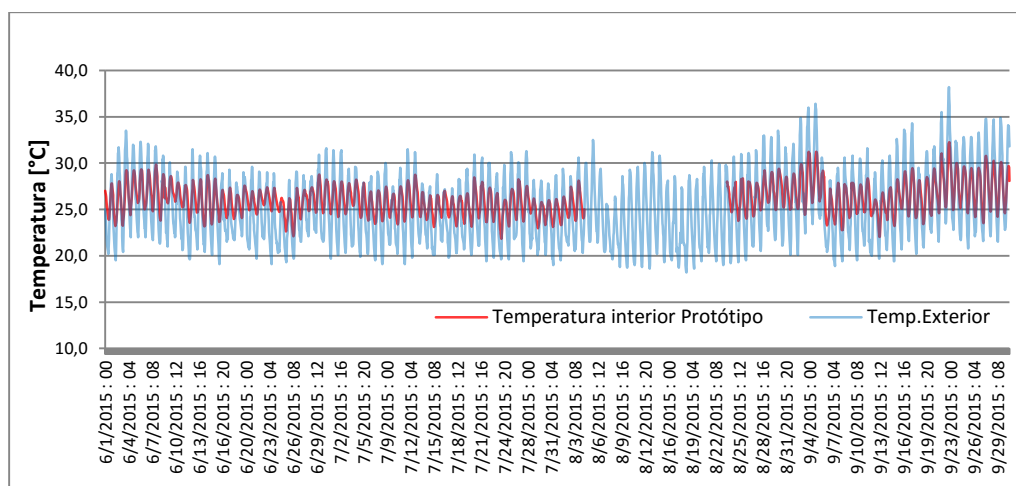


Fig. 50 - Registros da temperatura interior da casa de gesso no inverno em regime de livre flutuação

Verifica-se que a temperatura do ar interior da casa de gesso desenvolve-se de forma similar às variações de amplitude da temperatura do ar exterior, no entanto, quase que na totalidade do tempo medido, a temperatura de conforto de 25°C não é atingida com uma frequência maior.

Na Fig. 51, as curvas apresentadas correspondem à temperatura média mensal do ar interior da casa de gesso e a correlação entre a temperatura do ar exterior registrada por uma estação urbana do INMET.

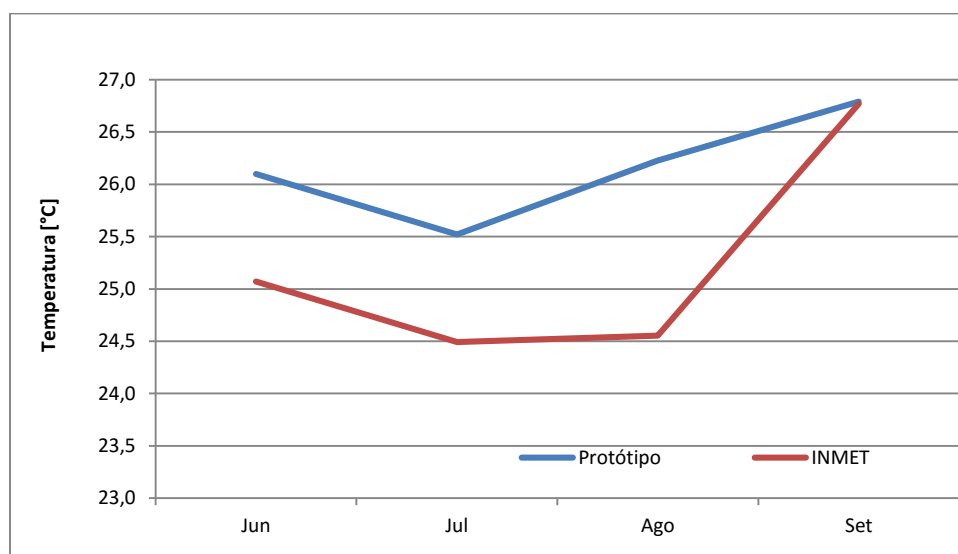


Fig. 51 - Temperatura média mensal do ar interior na estação de Inverno

De forma a analisar em detalhes o desempenho térmico do protótipo na estação do inverno, a Fig. 52 apresenta um gráfico do tipo *boxplot* onde é possível constatar através da média, mediana, valores máximo e mínimo e quartis 25 e 75, a distribuição da temperatura do ar interior.

Assim sendo, em uma análise comparativa destes valores para o período de Junho a Setembro de 2015, é possível verificar que as diferenças entre os quartis 25 e 75 demonstram maior dispersão nos meses de agosto e setembro, com diferenças maiores entre os valores máximos e mínimos, mais elevados no mês de setembro. A mediana para os registros na estação de inverno diferem muito pouco uma da outra e variam numa amplitude de 2°C, variando entre os 25°C e 27°C, coincidindo os valores nos meses de Junho e Agosto.

Verifica-se assim, que a amplitude térmica mais acentuada coincide com os meses extremos da estação de inverno, influenciada pelo fim e início da estação do verão, demonstrando assim ser a temperatura interior do protótipo suscetível às alterações do clima exterior.

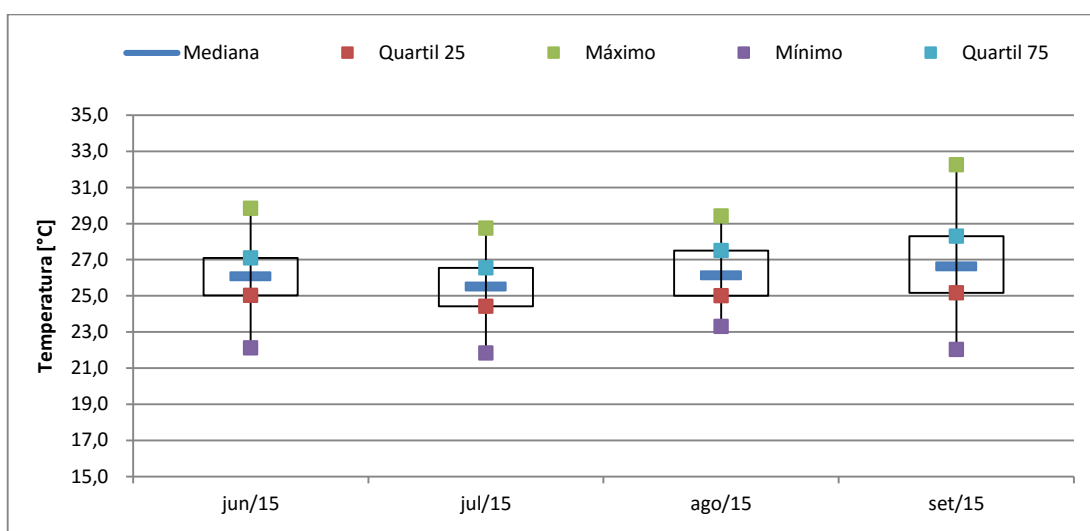


Fig. 52 - Distribuição da temperatura do ar interior do protótipo durante a estação do inverno

A Fig. 53 faz referência à curva de probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e exterior, para os meses referidos na estação do inverno.

Em ambos, os valores são aproximados, o protótipo de gesso possui uma temperatura do ar interior que varia entre 21,8°C e 32,2°C, resultando numa amplitude térmica global de 10,4°C; enquanto os registros exteriores variam entre 18,2°C e 38,2°C, resultando numa amplitude global de 20°C.

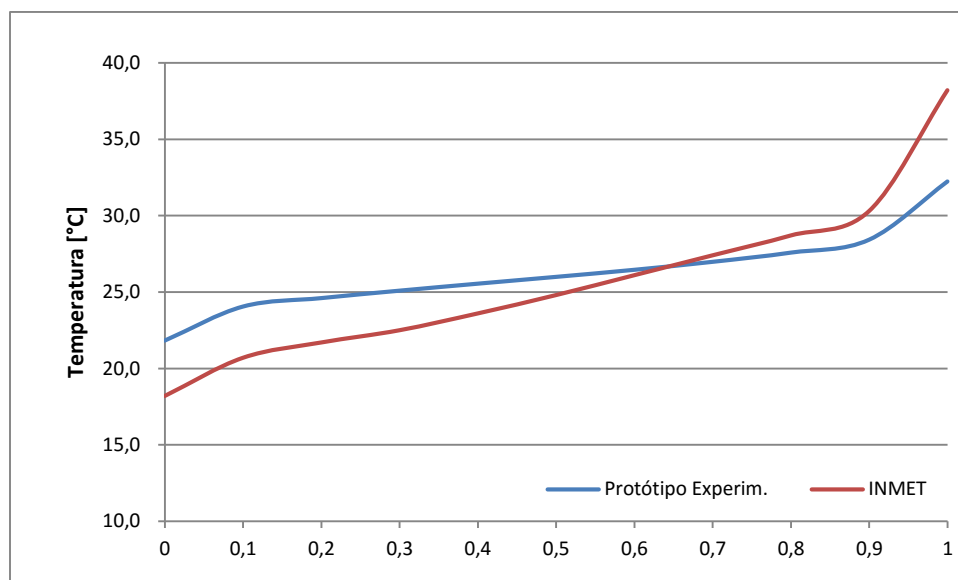


Fig. 53 - Curva de distribuição acumulada da temperatura do ar interior no inverno em livre flutuação

Dessa forma, a fim de completar a análise da temperatura do ar interior na estação de inverno, apresenta-se na Tabela 23 os valores das variáveis estatísticas mais importantes para caracterizar o desempenho do protótipo.

Tabela 23 - Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior na estação de inverno em flutuação livre

Variáveis Estatísticas	Temperatura Protótipo Inverno [°C]
Média	26,14
Máximo	32,25
Mínimo	21,83
Desvio Padrão	1,71
Mediana	26,00
Quartil 25	24,85
Quartil 75	27,29
Percentil 1%	22,84
Percentil 5%	23,63
Percentil 95%	29,20
Percentil 99%	30,61

Os resultados apresentados na Tabela 23 refletem o desempenho térmico global do protótipo casa de gesso em serviço. O valor da temperatura média do ar interior de 26,14 °C é bem próximo da mediana de 26 °C, sendo a diferença entre estes valores, 0,14 °C. Este diferencial mínimo de valor reflete um comportamento da temperatura interior sem apresentar grandes dispersões.

5.3.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR – VERÃO

Analogamente aos procedimentos adotados na estação de inverno, efetivou-se uma campanha de monitorização experimental na estação de Verão, correspondendo ao período de Janeiro a Maio e Outubro a Dezembro de 2015. Efetuaram-se os registros de medições também espaçados de 10 em 10 minutos ao longo de toda a estação, nos mesmos compartimentos, sala, cozinha, três dormitórios e dois WC, totalizando um elevado número de medições de dados de temperatura do ar interior, dessa vez por volta dos 34.800 registros.

Os dados obtidos de temperatura interior do protótipo foram obtidos em regime de livre flutuação da temperatura, o protótipo no período de monitorização esteve em serviço e ocupado por duas pessoas no período das 18 às 7 da manhã durante a semana e às 24 horas nos finais de semana. O controle de abertura das portas e janelas no período de monitorização, análogo à situação no período de inverno, também era exercido pelos residentes e semelhantes para as duas estações.

Para analisar os dados obtidos neste período de monitorização, apresentam-se os registros de temperatura do ar interior para toda a estação de verão.

Na Fig. 54 apresentam-se os registros da temperatura do ar interior e exterior ao protótipo. Convém salientar que esses registros representativos da temperatura interior da casa de gesso, são médias aritméticas dos registros dos sensores internos alocados nas zonas térmicas do referido protótipo.

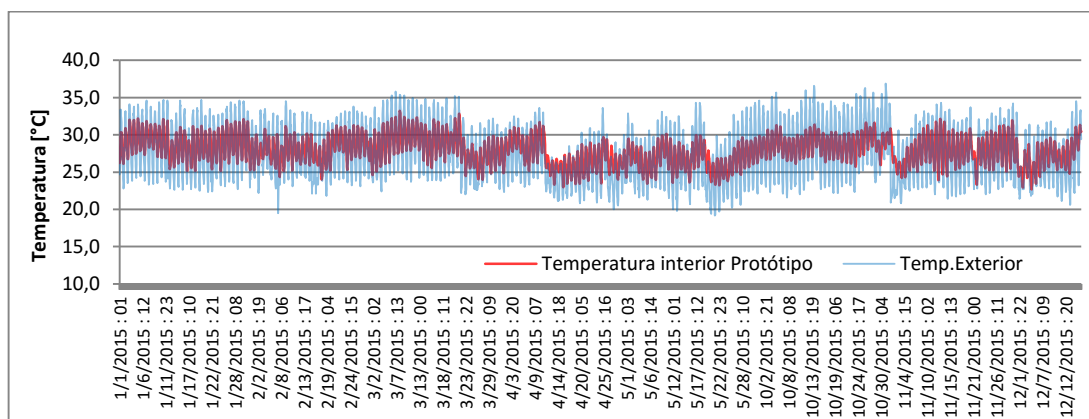


Fig. 54 - Registros da temperatura do ar interior e exterior durante a estação do verão em flutuação livre

Constata-se ao longo da estação de verão, que os registros da temperatura ar interior (Fig. 54) desenvolve-se de forma similar às variações de amplitude da temperatura do ar exterior.

Na Fig. 55 apresenta-se a temperatura média mensal do ar interior do protótipo para a estação do verão.

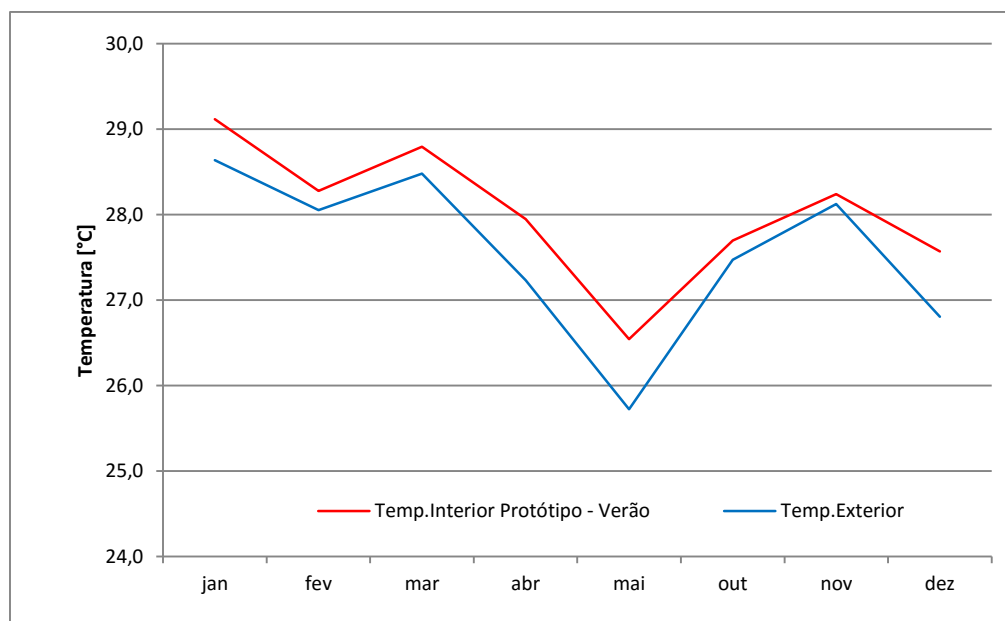


Fig. 55 - Temperatura Interior média mensal no verão

Em análise na Fig. 55, verifica-se que as variações dos registros médios mensais da temperatura do ar interior do protótipo são representativas do período demonstrado pela Fig. 54, com registros horários.

Aprofundando a análise, apresenta-se o gráfico do tipo boxplot (Fig. 56) da temperatura do ar interior do protótipo. Da análise do gráfico verifica-se que o desempenho térmico da casa de gesso possui uma variabilidade da temperatura mais elevada verificada para os meses de Março, Abril e Dezembro. Por sua vez nos demais meses da estação, a variabilidade comporta-se de forma menos expressiva, registrando o mês de Maio como o de menor variação. Este mês coincide com o fim da estação do verão e início do inverno no Brasil.

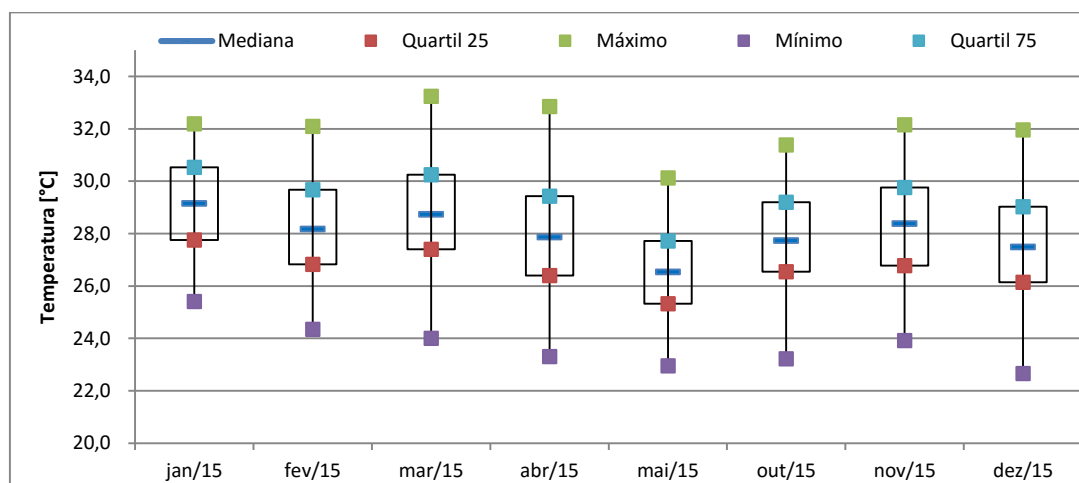


Fig. 56 - Distribuição da temperatura do ar interior do protótipo no Verão

A Fig. 57 refere-se à probabilidade acumulada da temperatura do ar interior do protótipo para a estação de verão. Em uma análise com maior rigor dos registros apresentados, constata-se que a temperatura do ar interior varia entre 22,6 °C e 33,25 °C, resultando uma amplitude térmica global de 10,59 °C.

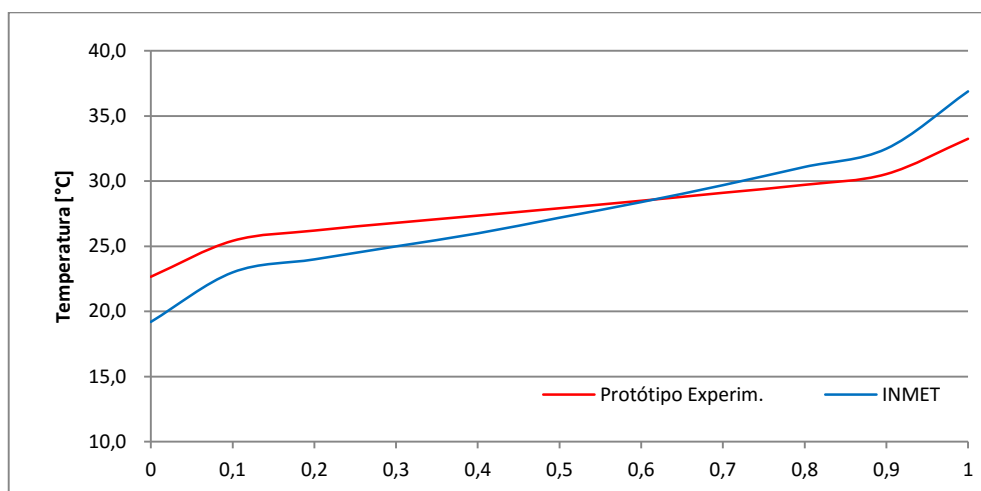


Fig. 57 - Curva de distribuição acumulada da temperatura do ar interior no verão

Visando complementar a análise da temperatura do ar interior na estação de verão, apresenta-se na Tabela 24 os valores das variáveis estatísticas mais importantes que caracterizam o desempenho térmico do protótipo casa de gesso.

Tabela 24 - Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior na estação do verão em flutuação livre

Variáveis Estatísticas	Temperatura Protótipo Verão [°C]
Média	27,94
Máximo	33,25
Mínimo	22,66
Desvio Padrão	1,94
Mediana	27,92
Quartil 25	26,52
Quartil 75	29,42
Percentil 1%	23,74
Percentil 5%	24,76
Percentil 95%	31,11
Percentil 99%	31,91

Dos resultados apresentados, verifica-se que no estudo do desempenho térmico da casa de gesso para as estações inverno e verão, demonstra não haver grandes variabilidades nas temperaturas registradas. É possível perceber no estudo diferenças em valores absolutos de 1,8°C; 1,0°C e 0,83°C entre as temperaturas médias, máximas e mínimas, respectivamente para as duas estações.

5.4. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Recorreu-se nesta tese à utilização do modelo adaptativo especificado na ASHRAE 55. O modelo faz um comparativo entre os registros da temperatura média mensal exterior e a temperatura operativa de conforto. Considerou-se a temperatura operativa de conforto tendo em vista ser esta, uma forma de obtenção de dados de conforto mais adequados à realidade quanto ao conforto interior, muito embora a ASHRAE 55 elenque um conjunto de simplificações que tornam válido a utilização da temperatura do ar interior como parâmetro nos cálculos do conforto térmico.

5.4.1. MODELO ADAPTATIVO – ASHRAE 55

Segundo o que prescreve a ASHRAE 55 [63], o modelo adaptativo assenta no cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , em função da temperatura média mensal exterior, T_m , corrigindo-a com um fator de correção que varia entre $\pm 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\pm 3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na proposta, os ocupantes destes edifícios podem livremente adaptar o seu vestuário às condições do ambiente interior.

O modelo é aplicável a edifícios condicionados naturalmente, especificando sua aplicação a cenários em que a temperatura média mensal exterior esteja enquadrada entre os 10°C e $33,5^{\circ}\text{C}$, considerando os limites de aceitabilidade de 80% e 90%.

5.4.2. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO – ESTAÇÃO INVERNO

O gráfico da Fig. 58 ilustra o estudo do conforto térmico à luz da ASHRAE 55 no protótipo casa de gesso para o inverno. No gráfico é possível observar a existência de 4 alinhamentos verticais de registros de medição. A análise do conforto térmico à luz do modelo da ASHRAE 55 estabelece-se em função da temperatura média mensal exterior, T_m e a temperatura operativa de conforto.

Os 4 alinhamentos verticais correspondem aos meses de Junho a Setembro de 2015.

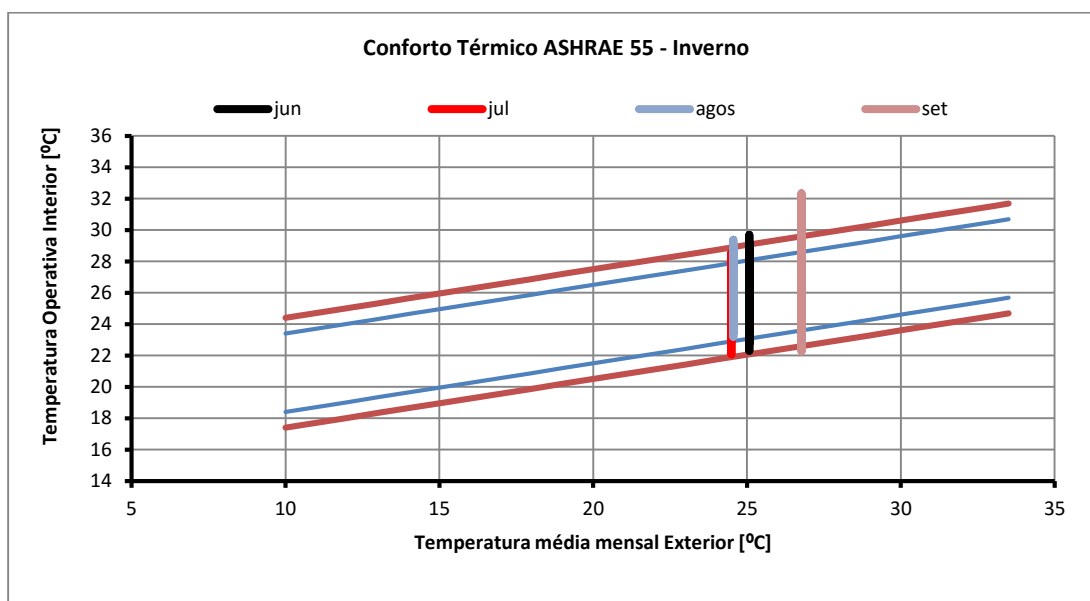


Fig. 58 - Conforto Térmico à luz da ASHRAE 55 para o protótipo no Inverno

Na Tabela 25 registra-se o número de horas de desconforto na estação de inverno para o protótipo. São apresentados o número de horas para os limites de 80 % e 90 % de aceitabilidade que constam da ASHRAE 55 [63] e respectivas porcentagens face ao número total de horas da estação do inverno. Em 27,21 % do tempo de medição se registra para o protótipo um cenário de desconforto térmico para 90% de aceitabilidade. Para 80% de aceitabilidade, a porcentagem do tempo de medição reduz para 19,16%.

Tabela 25 - Desconforto à luz da ASHRAE 55 para o protótipo casa de gesso- Inverno

Estação	Cenário	Desconforto (h) 80% aceitabilidade	Desconforto (h) 90% aceitabilidade	Porcentagem 80%	Porcentagem 90%
Inverno= 2928 h	Experimental	561	797	19,16	27,21

5.4.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO – ESTAÇÃO VERÃO

O gráfico da Fig. 59 ilustra o estudo do conforto térmico à luz da ASHRAE 55, no protótipo para o Verão. No gráfico é possível observar a existência de 8 alinhamentos verticais de registros de medição sobrepostos. Os 8 alinhamentos verticais correspondem aos meses de Janeiro a Maio e Outubro a Dezembro do ano de 2015.

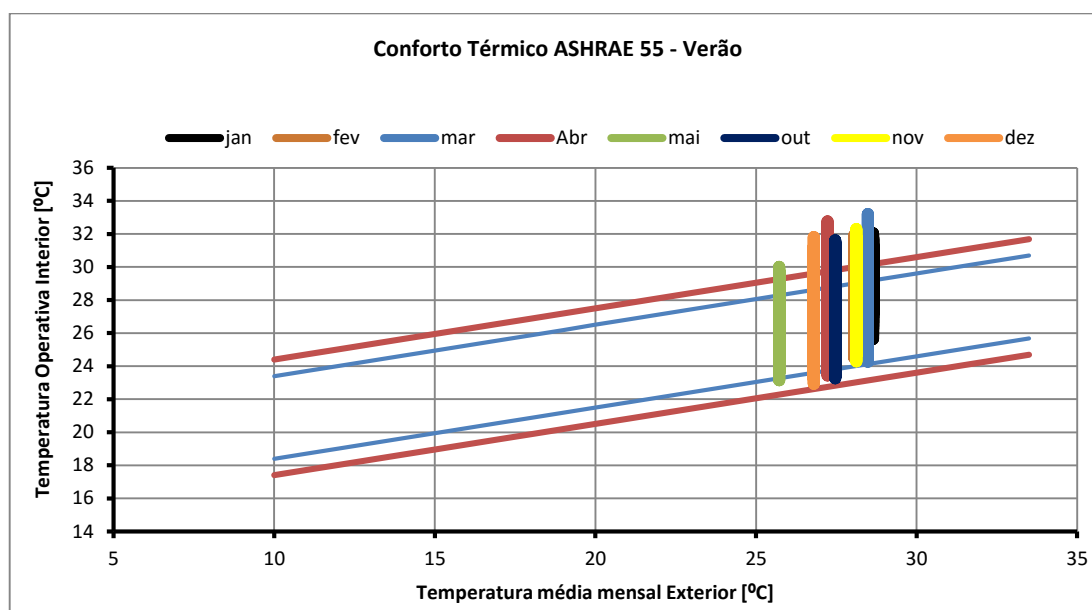


Fig. 59 - Conforto Térmico à luz da ASHRAE 55 para o protótipo no Verão

Na Tabela 26 registra-se o número de horas de desconforto na estação de verão para o protótipo. São apresentados o número de horas em desconforto para os limites de 80 % e 90 % de aceitabilidade que constam da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) e respectivas porcentagens face ao número total de horas da estação do verão. Em 39,48 % do tempo de medição se registra para o protótipo um cenário de desconforto térmico para 90% de aceitabilidade. Para 80% de aceitabilidade, a porcentagem do tempo de medição reduz para 23,35%.

Tabela 26 - Desconforto à luz da ASHRAE 55 para o protótipo casa de gesso- Verão

Estação	Cenário	Desconforto (h) 80% aceitabilidade	Desconforto (h) 90% aceitabilidade	Porcentagem 80%	Porcentagem 90%
Verão 5832 h	Experimental	1362	2303	23,35	39,48

5.5. SÍNTESE DOS RESULTADOS

Os procedimentos adotados neste capítulo trataram da caracterização física e experimental da casa de gesso no Brasil.

A metodologia utilizada e o processo de obtenção de dados higrotérmicos à distância entre o Brasil e Portugal foram nesta tese, de extrema importância, uma vez que, se utilizava de meios eletrônicos para transmissão dos mesmos, tornando o processo produtivo, não muito oneroso, facultando ao pesquisador poder usufruir dos dados “on line” e com boa confiabilidade.

O cumprimento dos principais objetivos estudados na caracterização experimental do desempenho térmico da casa de gesso em serviço permitiu a exploração dos seguintes pontos e possibilidades:

- Avaliar o efeito da temperatura exterior ao edifício construído em gesso no conforto térmico interior em serviço;
- Utilizar os resultados obtidos no processo de medição “*in situ*” para proceder à validação do modelo de simulação numérica em regime dinâmico que servirá de base ao estudo de sensibilidade a desenvolver por ocasião do processo de elaboração da Tese de doutoramento;
- Avaliar o desconforto da casa de gesso em serviço na região de instalação da mesma, com recursos à utilização de um ficheiro climático de confiabilidade;
- Permitir obter um conjunto alargado de resultados de medição, facilitando o estudo da variabilidade do desempenho térmico do protótipo em condições de serviço, em duas estações climáticas, inverno e verão;
- Verificar que a variabilidade da temperatura do ar interior no protótipo varia entre 1°C e 1,5°C, comparando-se as medianas e os primeiros e terceiros quartis, em ambas as estações estudadas, apresentando maiores variações na estação do verão, como se esperava;
- Necessidade de se avaliar os níveis de ventilação noturna visando obter melhorias nas condições térmicas interiores, bem como estudar as melhores taxas de renovações horárias com vistas a minorar os custos de energia de arrefecimento e oferta de melhores níveis de conforto interior no protótipo.

O capítulo a seguir faz um estudo exploratório da validação do modelo de simulação numérico utilizado no âmbito desta Tese, para posterior aplicação desse modelo a um estudo de sensibilidade a ser desenvolvido no capítulo 7.

6.

VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZADO

6.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A validação de um modelo numérico é de fundamental importância. Através desse processo é possível avaliar a capacidade do software para análise de um problema proposto dentro dos pressupostos e objetivos definidos. Por outro lado, será possível desenvolver estudos de sensibilidade para um conjunto de cenários possibilitando avaliar e quantificar o conforto térmico e o consumo energético de edifícios em outras localidades.

A vantagem da simulação dinâmica na fase de concepção dos edifícios é de permitir tomar a decisão que implica menos custos, ou que conduz a soluções mais eficientes, quando esse processo se dá num edifício já existente.

Após a introdução do modelo geométrico no software, e simulação, vem a validação. Segundo Augenbroe et.al [90], são essenciais essas três etapas no processo de simulação de um edifício.

A validação do modelo de simulação foi obtida através da comparação de dados medidos em campanhas experimentais e resultados obtidos nas simulações.

Para a validação do modelo numérico, foram seguidas várias etapas, das quais se destacam:

- Descrever o software WUFI Plus e respectivas equações matemáticas de balanço térmico para uma zona de simulação;
- Introduzir o modelo geométrico do edifício-tipo e simular, tendo-se estabelecido as zonas térmicas de simulação e as condições fronteiras: envolvente, clima interior e clima exterior;
- Definir as propriedades dos materiais de composição da envoltória da casa de gesso-tipo;
- Definir as zonas térmicas no software WUFIPlus;
- Comparar os valores da temperatura do ar interior obtidos numericamente com os resultados da medição experimental para dois períodos do ano, Inverno e Verão;

Após considerar validado o programa de simulação, dada a proximidade dos valores numéricos e experimentais, consideram-se reunidas as condições para o desenvolvimento do estudo de sensibilidade apresentado no capítulo 7.

6.2. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO SELECIONADO

A utilização de ferramentas de simulação higrotérmica avançada com o objetivo de simular o comportamento higrotérmico de edifícios constitui um dos objetivos nesta tese.

Vários autores evidenciaram a importância de recurso a modelos computacionais na previsão do desempenho de edifícios. Esses modelos tornaram possíveis analisar em tempo reduzido e com confiabilidade os efeitos de diversos parâmetros relacionados à edificação modulada [85]; [86].

Delgado et al [84], afirmam que entre os benefícios de simular, está a previsão do comportamento higrotérmico de um edifício em tempo real.

Autores como Pedrini, A; Hyde, R.A [93], afirmam que passados quatro décadas de desenvolvimento de programas de simulação higrotérmica, a realidade é que esses softwares ainda não são uma realidade em escritórios de arquitetura e engenharia.

Wilde [94], Venâncio [95], em pesquisas desenvolvida na Holanda, afirmam que a maioria dos arquitetos (67%) não utilizam ferramentas de suporte às decisões arquitetônicas e, aproximadamente 80% dessas decisões que se referem a um conjunto de seleção de estratégias passivas de condicionamento ambiental, é realizada de forma intuitiva e não leva em consideração outras alternativas.

A Tabela 27 descreve várias ferramentas de simulação existentes incluindo a designação e suas organizações responsáveis.

Tabela 27 - Ferramentas de simulação - adaptado de [84],[95],[103].

Programas	Organizações Responsáveis
Blast	CERL- U.S.Army Construction Engineering Research Laboratories, USA
DOE-2	LANL- Los Alamos National Laboratory, USA LBNL- Lawrence Berkeley National Laboratory, USA James J. Hirsch & Associates, USA
ESP	Strathclyde University, GB
SRES/SUN	NREL- National Renewable Energy Laboratory, USA Ecotope, USA
SRES/BRE	NREL- National Renewable Energy Laboratory, USA BRE - Building Research Establishment, GB
S3PAS	Universidade de Sevilha, Espanha
TASE	Tampere University, Finlândia
TRNSYS	University of Wisconsin, USA
TRNSYS/TUD	University of Wisconsin, USA Technische Universität Dresden, Alemanha
CA-SIS	Electricité de France, França
CLIM2000	Electricité de France, França

Programas (continuação)	Organizações Responsáveis
ENERGYPLUS	LBNL - Lawrence Berkeley National Laboratory, USA UIUC - University of Illinois Urbana/ Champaign, USA CERL- U.S.Army Construction Engineering Research Laboratories, USA OSU-Oklahoma State University, USA GARD Analytics, USA FSEC - University of Central Florida, Florida Solar Energy Center, USA DOE-OBT Department of Energy, Office of Building Technology, USA
WUFIPlus	Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), Alemanha

6.2.1. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO WUFIPLUS

Tendo por base a estratégia do L.F.C, o programa escolhido dentre uma gama de ferramentas de simulação e versões disponíveis, foi o WUFIPlus, desenvolvido no “Fraunhofer Instituts für Bauphysik”-IBP em Holzkirchen, Alemanha. O software possui uma vasta validação experimental junto à comunidade científica, e combina a simulação energética com o cálculo da componente higrotérmica, cujos resultados são de extrema importância no presente estudo.

Com a finalidade de justificar a adequabilidade do programa avançado WUFIPlus para uso nesta Tese, enumeram-se alguns aspectos que determinaram essa escolha:

- As ligações privilegiadas entre o Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e o IBP, que permitem dirimir dúvidas surgidas pela utilização do programa WUFI Plus;
- A importância da experiência adquirida em teses anteriores.

O algoritmo de cálculo do WUFIPlus é baseado no método dos elementos finitos. Este método trabalha a equação de calor diretamente por aproximação das suas derivadas às de uma série de Taylor truncada, ou indiretamente, por aplicação do princípio da conservação da energia a pequenos volumes de controle [104].

Na Fig. 60 apresenta-se o processo de cálculo do WUFI Plus.

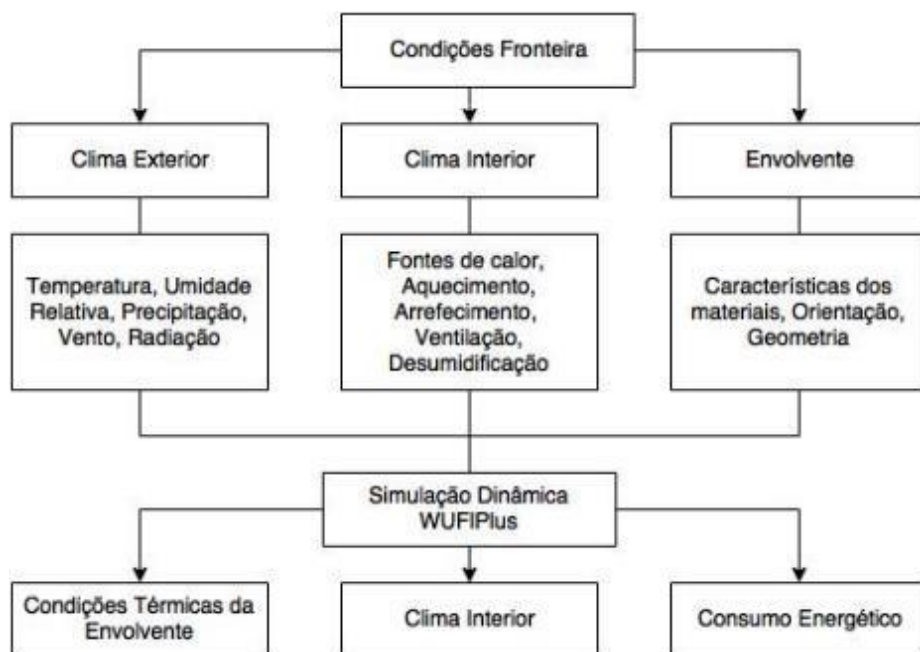


Fig. 60 - Esquema do processo de cálculo do WUFI Plus [adaptado de 96].

Na Fig. 61 é apresentado um exemplo concreto de um output relativo às condições higrotérmicas de duas zonas térmicas (Z1 e Z2) simuladas da casa de gesso, onde é possível observar valores de temperatura e umidade relativa do ar interior, bem como valores de cálculo de energia de aquecimento e temperatura de superfície média de janelas.

Export of WUFIplus results: Case 1							
Calculation time: 1/1/2015 : 00 - 1/1/2016 : 00							
Export time: 1/1/2015 : 00 - 1/1/2016 : 00							
Values multiplied by 1							
Count of columns 8:							
1 - Date / Time							
2 - Time ascending [h], multiplied by 1							
3 - Temperature of exterior air [°C]							
4 - Rel. humidity of outer air [%]							
5 - Z.1: Temperature of interior air [°C]							
6 - Z.1: Rel. humidity of inner air [%]							
7 - Z.1: Heating power [kW]							
8 - Z.2: Mean windows inner surface temperature [°C]							
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8
1/1/2015 :	1	27,4	51	20,89844	61,875	0	23,20584
1/1/2015 :	2	27,1	52	21,44531	66,25	0	23,45216
1/1/2015 :	3	26,3	57	21,75781	70	0	23,38243
1/1/2015 :	4	25,7	59	21,95313	71,875	0	23,29549
1/1/2015 :	5	25	61	22,01172	73,4375	0	23,09746
1/1/2015 :	6	24,6	62	22,07031	73,75	0	23,0059
1/1/2015 :	7	25,3	62	22,5	72,5	0	23,41812
1/1/2015 :	8	27	57	23,47656	68,75	0	24,55064
1/1/2015 :	9	28,6	52	24,72656	65	0	25,84925

Fig. 61 - Output do Programa WUFIPlus relativo a duas zonas térmicas simuladas

6.3. MODELAÇÃO GEOMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO-TIPO

A modelação de um edifício passa pela definição de sua geometria. A execução do modelo geométrico implicou a consulta do projeto original da casa de gesso, cujas dimensões foram introduzidas no software.

Simular numericamente com recursos a modelos necessita de dados climáticos exteriores locais e da definição correta das condições fronteiras, fontes de calor interior, o que configura em alguns casos um processo complexo.

Nesta Tese, optou-se por recorrer à utilização de um modelo geométrico simplificado, com definição das zonas térmicas. A Fig. 62 representa uma planta do piso “0” da casa de gesso-tipo, com identificação dos compartimentos e da orientação solar.



Fig. 62 - Planta piso “0” da casa de gesso-tipo com detalhes dos cômodos

Cada zona térmica determinada corresponde a um cômodo, ou agregação de mais do que um, com características e comportamento térmico similares.

Para implementação do modelo, foram consideradas as seguintes zonas térmicas:

- Zona térmica Z1, constituída pelo agrupamento dos cômodos: cozinha, sala e circulação, orientados à SW;
- Zona térmica Z2, constituída pelo dormitório 1, orientado a NE;
- Zona térmica Z3, constituída pelo WC do dormitório 1, orientado à NE;
- Zona térmica Z4, constituída pelo dormitório 2, orientado à NW;
- Zona térmica Z5, constituída pelo dormitório 3, orientado à NW;
- Zona térmica Z6, constituída pelo WC social, orientado a NW.

Neste subcapítulo o modelo geométrico utilizado nas simulações é apresentado; também são apresentados em pormenores os dados climáticos utilizados na validação do modelo. Salienta-se que a validação do modelo foi obtida confrontando-se as medições experimentais com os resultados obtidos na simulação.

A Fig. 63 apresenta o modelo geométrico da casa de gesso-tipo, utilizado na validação do programa WUFIPlus.

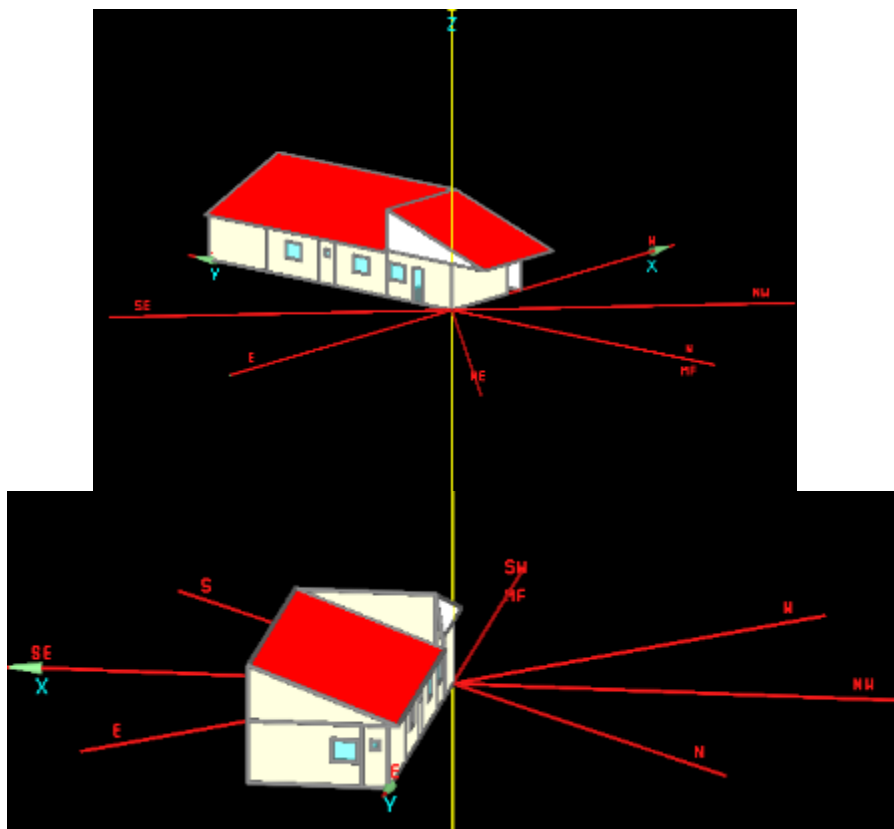


Fig. 63 - Modelação da casa de gesso no WUFI-Plus

Na Fig. 64 é apresentado o elemento denominado no programa como “attached zones” que neste caso é composto pelos desvãos, denominados “grande” e “pequeno”, zonas fortemente ventiladas. É permitido nestas zonas que se possa adotar climas opcionais, porém para este caso, foram consideradas como zonas exteriores.

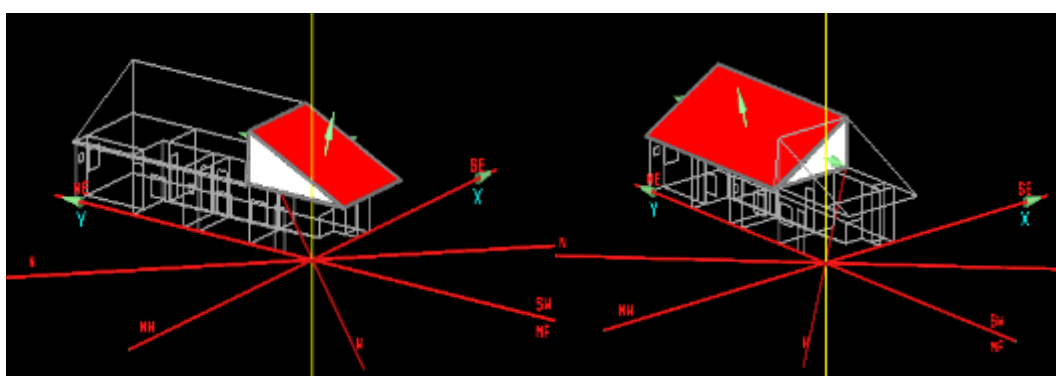


Fig. 64 - Desvãos “grande” e “pequeno” fortemente ventilados

6.3.1. DADOS CLIMÁTICOS EXTERIORES

Os dados disponibilizados pelo Laboratório do INMET em Petrolina inclui os seguintes parâmetros conforme pode ser observado na Fig. 65:

- Temperatura do ar a 1,5m [°C];
- Umidade relativa do ar a 1,5m [%];
- Velocidade do vento a 2m [m/s];
- Radiação solar Global [W/m²];
- Precipitação [mm].

Dispondo destes dados, foi necessário tratar a informação disponibilizada pela estação meteorológica para converter em um ficheiro climático válido e reconhecido pelo WUFIPlus.

Ficheiro Climático-Petrolina 2014 - Laborat.Meteorologia UNIVASF														
contagem	Data	Chuva	Temperatura do ar a 1,5m				Umidade relativa do ar a 1,5m				Velocidade do vento a 2 metros			
	Data	Alt. (mm)	Instante	Máxima	Mínima	Média	Instante	Máxima	Mínima	Média	Instante	Máxima	Mínima	Média
			Temp.Ar				Umid.Relat.Ar							
1	01/01/2012 00:00	0	24,37	24,8	23,92	24,53	67,22	67,27	60,3	63,36	0,447	5,247	0,447	0,696
2	01/01/2012 01:00	0	23,37	24,42	23,34	23,87	73,8	73,8	67,19	70,7	0,447	0,447	0,447	0,447
3	01/01/2012 02:00	0	22,67	23,38	22,65	22,93	77,3	77,4	73,8	76	0,447	0,447	0,447	0,447
4	01/01/2012 03:00	0	22,46	22,71	22,28	22,47	72,1	77,4	72,1	76,2	0,447	2,847	0,447	0,481
5	01/01/2012 04:00	0	22,56	22,69	22,46	22,56	70,5	72,3	69,81	71,1	0,447	6,047	0,447	1,389
6	01/01/2012 05:00	0	22,5	22,56	22,16	22,33	72,2	72,6	70,5	71,7	0,447	5,647	0,447	0,657
7	01/01/2012 06:00	0	23,69	23,69	22,51	23,11	69,1	72,5	68,39	70,3	4,447	9,65	0,447	3,501
8	01/01/2012 07:00	0	25,15	25,23	23,65	24,43	66,27	69,67	63,17	66,98	2,047	8,05	0,447	3,917
9	01/01/2012 08:00	0	26,82	26,84	25,01	25,73	60,21	66,99	58,94	62,87	0,447	7,25	0,447	3,578
10	01/01/2012 09:00	0	28,27	28,31	26,51	27,37	53,96	61,79	51,57	57,05	0,447	7,25	0,447	2,653
11	01/01/2012 10:00	0	28,9	29,67	28,06	28,83	48,95	56,28	45,42	50,45	0,447	8,85	0,447	2,674
12	01/01/2012 11:00	0	30,07	30,28	28,9	29,8	44,55	51,65	41,77	45,71	3,247	7,25	0,447	1,8
13	01/01/2012 12:00	0	31,19	31,37	29,44	30,37	40,45	48,24	38,47	42,71	4,447	7,65	0,447	1,401
14	01/01/2012 13:00	0	31,88	31,94	30,9	31,43	37,33	46	35,61	39,12	0,447	6,447	0,447	1,604
15	01/01/2012 14:00	0	31,86	32,2	31,34	31,76	35,12	41,6	33,45	36,95	0,447	5,247	0,447	0,924
16	01/01/2012 15:00	0	32,06	32,33	31,8	32,03	32,38	38,14	31,45	34,52	0,447	4,847	0,447	0,974
17	01/01/2012 16:00	0	31,39	32,3	31,34	31,75	33,24	36,7	30,49	33,51	0,447	5,647	0,447	0,788
18	01/01/2012 17:00	0	29,73	31,51	29,73	30,77	37,94	38,21	32,21	35,22	0,447	0,847	0,447	0,448
19	01/01/2012 18:00	0	28,35	29,73	28,34	29,07	44,8	44,86	37,69	41,01	0,447	0,847	0,447	0,448
20	01/01/2012 19:00	0	28,03	28,37	27,81	28,01	45,08	46,72	44,33	45,75	0,447	1,647	0,447	0,45
21	01/01/2012 20:00	0	27,03	28,04	27,01	27,48	48,55	48,55	44,92	46,94	0,447	0,447	0,447	0,447

Fig. 65 - Dados meteorológicos estação do INMET em Petrolina-PE

A Fig. 66 apresenta dados climáticos temperatura e umidade relativa do ar exterior para a estação de inverno, em curto período, 17 a 21 de setembro, embora para a validação do modelo na estação, foi adotado o período de 01 de Junho a 31 de Julho de 2015 (Fig.77).

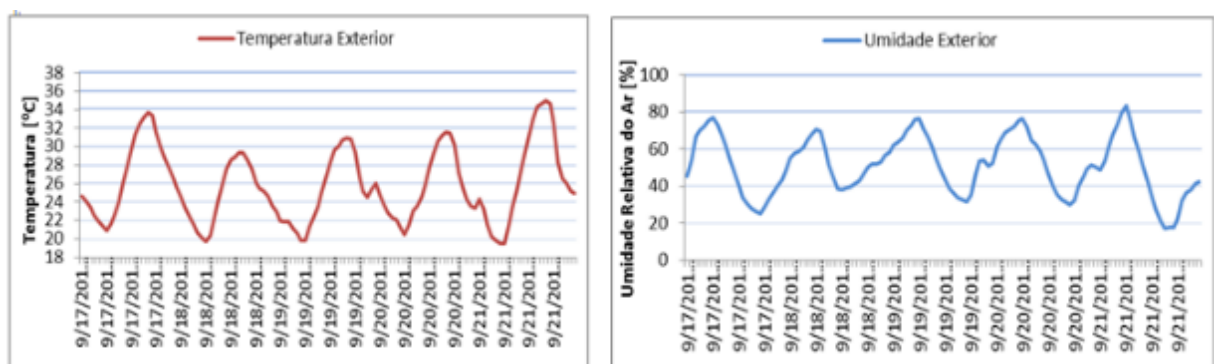


Fig. 66 - Temperatura e umidade relativa do ar exterior no período de 17 a 21/09/2015 na estação de inverno

Na Fig. 67 são apresentados valores de velocidade do vento para os mesmos dias especificados dentro do período da estação de inverno.

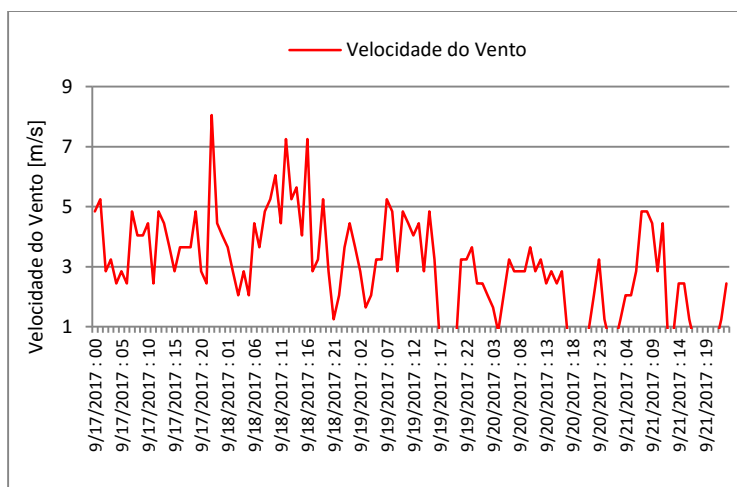


Fig. 67 - Velocidade do vento para o período de validação do edifício-tipo na estação de inverno.

A precipitação pluviométrica para o período analisado foi nula.

Na Fig. 68 são apresentados dados climáticos temperatura e umidade relativa do ar exterior usados para a estação de verão, em curto período, 18 a 23 de março, embora para a validação do modelo na estação, foi adotado o período de 01 de Janeiro a 14 de Maio de 2015.

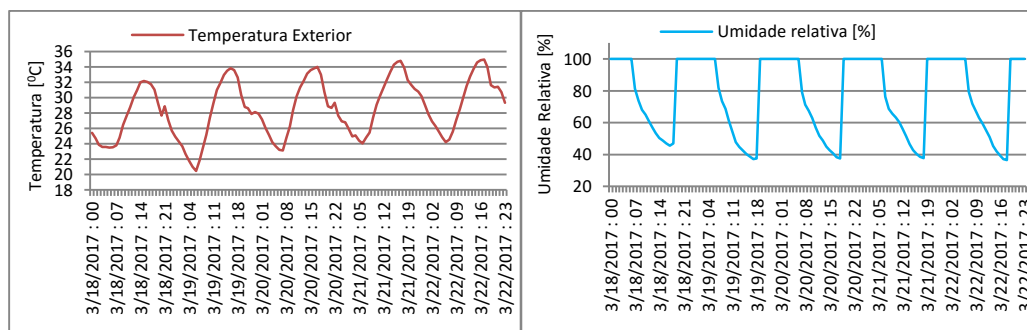


Fig. 68 - Temperatura e umidade relativa do ar exterior no período de 18 a 23/03/2015 na estação de verão.

Na Fig. 69 é apresentado os valores de velocidade do vento dentro do período de validação do edifício-tipo em estudo na estação de verão.

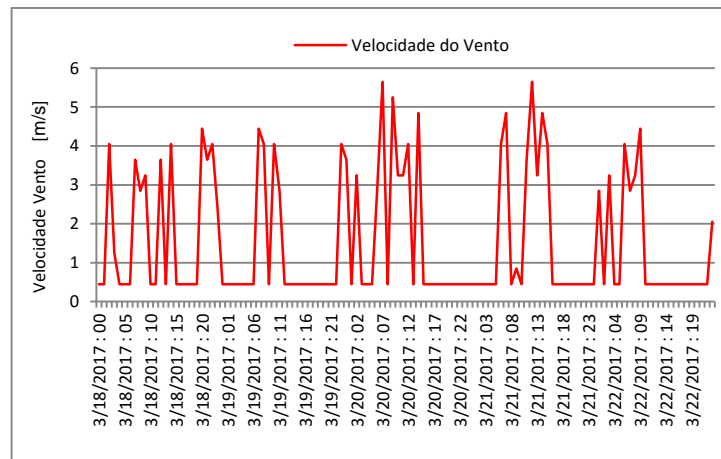


Fig. 69 - Velocidade do Vento para o período de validação do edifício-tipo na estação de verão.

A Precipitação pluviométrica para este período analisado, também foi nula.

6.3.2. PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS INSERIDOS NO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO WUFIPLUS

Segundo Ramos et.al [98], as propriedades inerentes aos materiais podem ser obtidas em pesquisas de laboratório, por recorrência à base de dados do WUFIPlus ou através de consultas a bibliografias disponíveis na literatura [99]; [100]; [101]; [102].

O programa WUFIPlus possui uma interface de fácil acesso, possibilitando ao utilizador editar, ou constituir novos componentes a partir dos já existentes na sua biblioteca. Por outro lado, é possível modificar propriedades, alterar espessuras, facilitando em termos gerais a tarefa de quem o utiliza.

O software WUFIPlus possui uma base de dados relativamente completa com as propriedades dos materiais de construção. O programa também permite que sejam introduzidos na sua base de dados, propriedades de materiais não presentes. A correta inserção destas é de extrema importância na simulação. As principais a serem introduzidas no WUFIPlus são enumeradas por:

1- Propriedades:

- Massa volúmica (kg/m^3);
- Porosidade (m^3/m^3);
- Calor específico do material seco (J/kg.K);
- Condutibilidade térmica do material seco (W/m.K);
- Fator de resistência à difusão de vapor (-).
- Coeficiente de absorção de água ($\text{kg}/(\text{m}^2.\sqrt{\text{s}})$)
- Permeabilidade ao vapor de água ($\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$)

Os parâmetros de base à implementação de um estudo de simulação numérica de um edifício, compreende um conjunto de informações úteis e necessárias relativas às propriedades dos materiais, geometria da envolvente, além das condições de fronteira [84].

Na Fig. 70 é possível enquadrar os três dados fundamentais para simulação higrotérmica de um edifício.

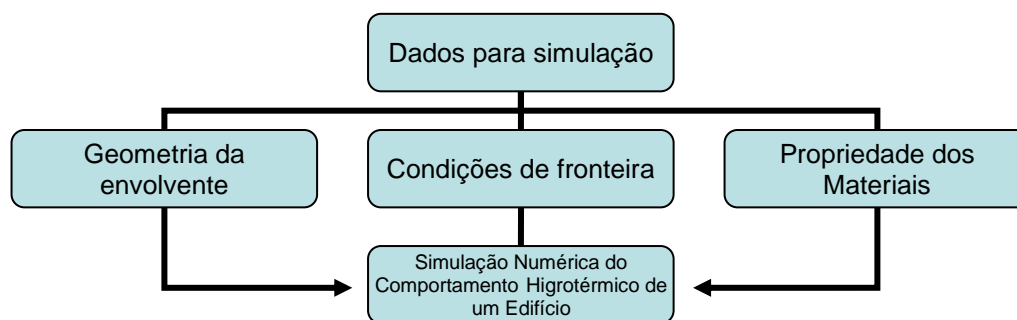


Fig. 70 - Fluxograma de dados para modelos de simulação higrotérmica (adaptado de [84])

A Fig. 71 e a Tabela 28 mostram as propriedades do material construtivo gesso introduzido no programa de cálculo avançado WUFIPlus, material essencial da casa de gesso.

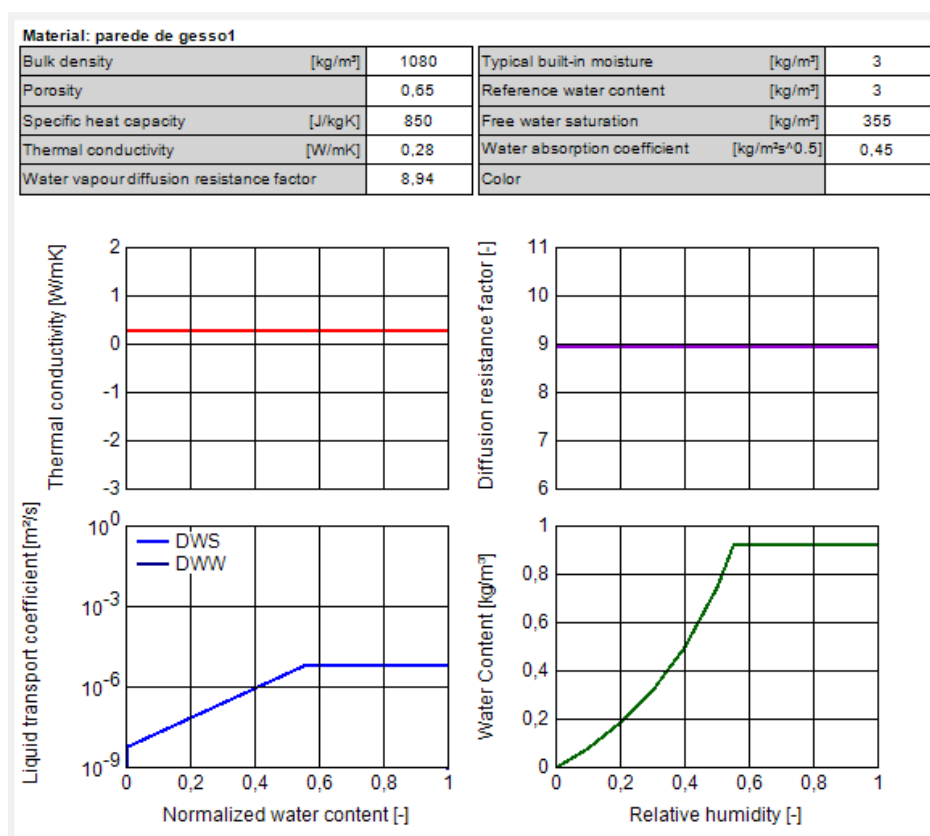


Fig. 71 - Curvas das propriedades do gesso após introdução no WUFIPlus [96]

Tabela 28 - Propriedades dos Blocos de Gesso Utilizados na Simulação com WUFIPlus

Propriedade	Unidade	Bloco de gesso
Massa Volúmica	kg/m ³	1.080
Condutibilidade Térmica [λ]	W/(m.K)	0,28
Fator de Resistência à Difusão [μ]	-	Tina _{seca} 8,94
		Tina _{úmida} 6,34
Permeabilidade ao vapor de água [δ]	kg/(m.s.Pa)	Tina _{seca} 2,52 x 10 ⁻¹¹
		Tina _{úmida} 3,04 x 10 ⁻¹¹
Calor específico [c]	J/(kg.K)	850
Coefficiente de Absorção de Água [A]	kg/(m ² .√s)	0.45
Porosidade	m ³ /m ³	0.65

Na Fig. 72 são apresentadas as características dos vãos envidraçados utilizados nas simulações na casa de gesso-tipo, nomeadamente: os valores de U_w (coeficiente de transmissão térmica), da frame factor (fração solar), fator solar de envidraçados (SHGC hemisférico) e emissividade, extraídos da biblioteca que consta no software WUFIPlus.

The screenshot displays the 'Janela' (Window) configuration window in WUFIPlus. It includes a 'Parameters' section with the following values: U_w [W/m²K] = 5.80, Frame factor [-] = 0.7, SHGC hemispherical [-] = 0.6, and Emissivity of external surface [-] = 0.85. The 'SHGC detailed' section provides a table of incident angles and their corresponding SHGC values. The 'Frame parameters' section includes a table for specifying frame properties for different orientations.

Incident angle [°]	SHGC [-]
0	0.7
60	0.58
80	0.23

Specification	Left	Right	Top	Bottom
Frame width [m]				
Installation U-Value [W/m²K]				
Glazing-Frame Psi-Value [W/mK]				
Frame-Wall Psi-Value* [W/mK]				

Fig. 72 - Propriedade dos elementos envidraçados introduzidos no WUFIPlus [96]

6.3.3. GANHOS INTERNOS DE CALOR POR OCUPAÇÃO, EQUIPAMENTOS E ILUMINAÇÃO

Os ganhos internos de calor do edifício em estudo estão condicionados a fatores relacionados à ocupação humana, equipamentos elétricos e sistema de iluminação. Frota e Schiffer [88] afirmam que as cargas térmicas a serem geradas internamente são sempre em função das exigências humanas e funcionais, e constitui um dos componentes fundamentais no cálculo do balanço térmico. A sua correta contabilização condiciona os resultados.

Estão incluídos nos ganhos internos:

- Atividades metabólicas desenvolvidas pelos usuários;

- Demandas de iluminação;
- Utilização de equipamentos em geral.

Na Tabela 29 estão os valores de produção de vapor, do calor convectivo e radiante, de produção de CO₂, ocupação e atividade.

Tabela 29 - Valores de Ganhos de calor por ocupação/tipo considerados na simulação no programa WUFIPlus

Ocupação/tipo	Nível de Ocupação	Umidade [g/h]	Calor Convectivo [W]	Calor Radiante [W]	Produção de CO ₂ [g/h]	Atividade Humana [met]
Adulto	pessoa	43	65	36	30.3	0,97

A Fig. 73 indica os valores adotados a título de ganhos de calor convectivo e radiativo referente iluminação e equipamento utilizados na validação do software WUFIPlus. Os valores foram lançados no software em virtude do mesmo não dispor em sua biblioteca de valores que referenciasse especificamente cargas de iluminação e equipamentos.

☐ Use data from external file

Periods

Nr.	Begin	End	Mo	We	Th	Fr	Sa	Su
1	01/01/2015	01/01/2018	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	01/01/2015	01/01/2016	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

New
Delete
Copy
Insert
New/Insert: >>

Day-profile

Hour	Heat conv. W	Heat radiant W	Moisture g/h	CO2 g/h	Human activity [met]
0	130	72	86	60.6	1.94

New
Delete
Copy
Insert
New/Insert: >>

Calculator interior

Fig. 73 - Contabilização de ganhos Internos de Iluminação e Equipamentos

Para efeito de simulação considerou-se a ventilação natural noturna de 2 RPH, no período das 21h às 06h, e 1 RPH diurno, todos os dias de semana (Fig. 74).

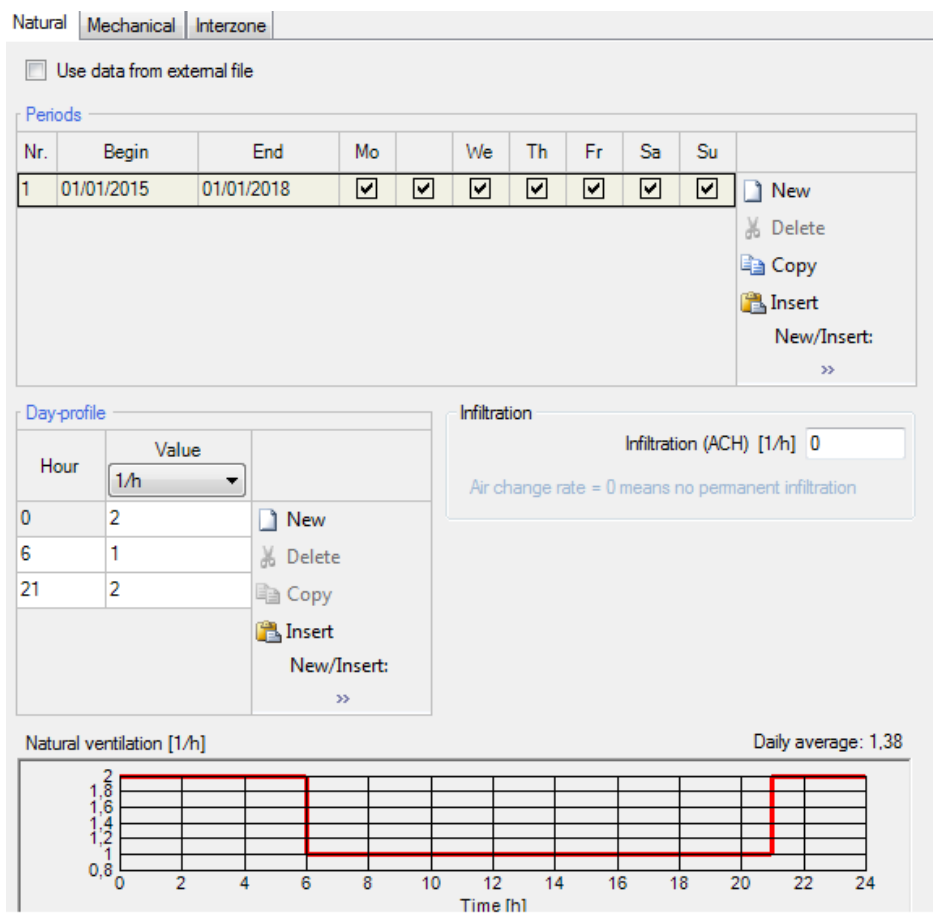


Fig. 74 - Perfil de contabilização da ventilação noturna no WUFI Plus

6.3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE UTILIZAÇÃO

A partir do conhecimento dos hábitos de utilização da casa de gesso-tipo, e dos dados resultantes, elaborou-se um perfil diário de ocupação, para as várias zonas térmicas do modelo. (Fig. 75).

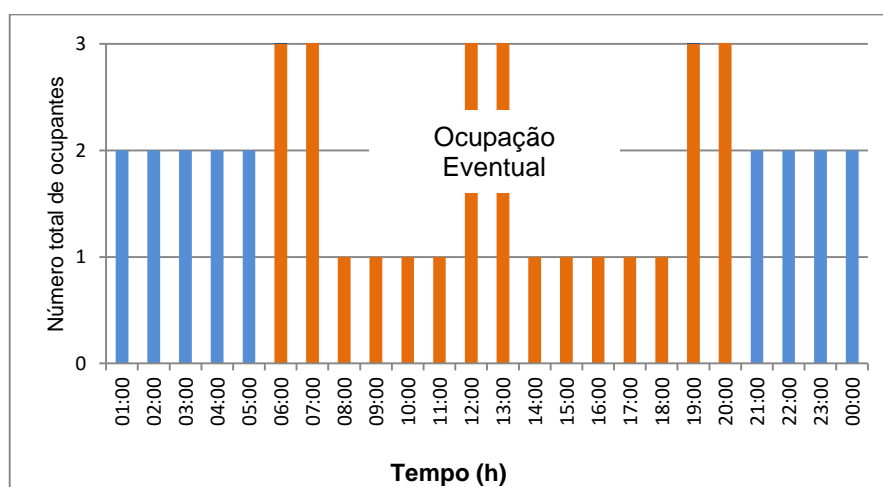


Fig. 75 - Perfil de ocupação na contabilização dos ganhos internos

6.3.5. DEFINIÇÕES DE CONDIÇÕES INICIAIS DE SIMULAÇÃO

Foram introduzidas no programa as condições iniciais de simulação relativas à temperatura do ar interior, umidade relativa interior, da concentração de CO₂ e da forma como são distribuídos os ganhos solares nas superfícies interiores (ver Tabela 30).

Tabela 30 - Condições iniciais das simulações

Outros Parâmetros de Simulação	Valores Iniciais
Temperatura inicial de simulação	25°C
Umidade relativa inicial	55%
Concentração de CO ₂ inicial	1000 ppmv
Distribuição de ganhos solares nas superfícies internas	Proporcional à área

6.3.6. DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO E VENTILAÇÃO

No programa existe um modelo destinado à definição dos sistemas de climatização. No presente estudo foi utilizado um sistema de ar condicionado elétrico que permite assegurar o arrefecimento necessário para estabelecer o conforto interior no período de verão, com uma temperatura de funcionamento de 25°C.

O WUFIPlus faculta ao utilizador a definição de diferentes períodos de funcionamento (Fig. 76) através do perfil, que pode variar o dia ou períodos que se julgue necessários.

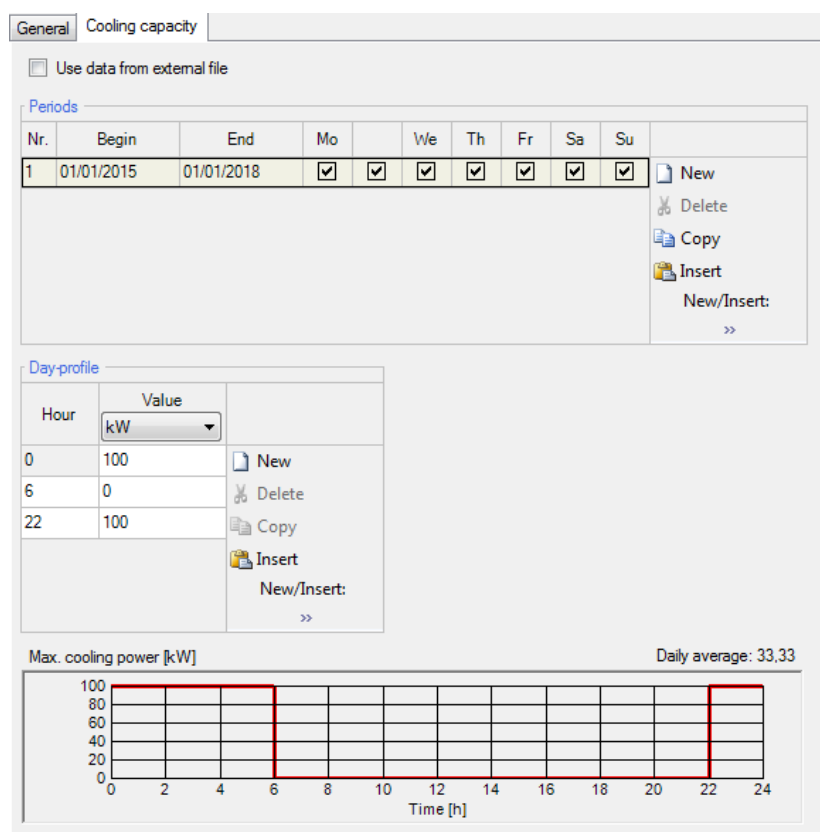


Fig. 76 - Perfil de definição de um sistema de arrefecimento modelado no WUFIPlus

6.4. VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICO

A validação de um modelo numérico constitui uma tarefa primordial quando se deseja utilizar esse modelo em estudos paramétricos futuros. É fundamental conhecer em profundidade o software utilizado bem como a inserção correta das propriedades dos materiais e o estudo dos diversos parâmetros que possam influenciar nos resultados dos cálculos: Por exemplo dos ganhos internos, proteções de envidraçados e graus de ventilação.

O processo de validação do modelo numérico foi conseguido através da comparação dos valores de temperatura do ar interior obtidos experimentalmente e a temperatura simulada numericamente para a zona térmica “Sala de Estar”, por constituir uma área de permanência prolongada na casa de gesso-tipo.

Foram considerados para validação dois períodos alargados a seguir descritos:

- Um período para a estação de Inverno, compreendido entre os dias 1 de junho e 31 de Julho de 2015;
- Um período para a estação de Verão, compreendido entre os dias 1 de Janeiro e 15 de Maio de 2015.

Neste período de validação, a casa protótipo em estudo esteve em serviço e ocupada por duas pessoas, eventualmente uma terceira pessoa (ver Fig.75).

A validação centrou-se na temperatura do ar interior, tendo em atenção uma maior dificuldade em validar o modelo para umidade relativa. No entanto, no capítulo é apresentado também um comparativo da umidade relativa do ar nos dois períodos, inverno e verão.

A validação dos valores da temperatura é substancialmente mais importante pelo fato do estudo de sensibilidade realizado no capítulo 7, estar centrado na determinação do conforto térmico com base na norma ASHRAE 55.

No processo de validação do modelo numérico levaram-se em consideração algumas premissas mantidas constantes e sintetizadas na Tabela 31.

Tabela 31 - Premissas consideradas no processo de validação do modelo

Condições	Inverno	Verão
Fator Solar de envidraçados	0,7	
Mobiliário	Não se considerou seu volume e massa	
Ocupação	2 pessoas e eventualmente uma terceira	
Regime de arrefecimento	Inexistente na validação do modelo	
Regime de ventilação Noturna	Acionado todo o ano das 21:00h às 06:00h (2Rph)	
Regime de ventilação diurna	Acionado todos os dias das 06:00h às 21:00h (1Rph)	

Os resultados da validação do modelo numérico na estação do Inverno e do Verão estão organizados da seguinte forma:

- Temperatura do ar interior na estação do Inverno - Compara-se a temperatura do ar interior obtida numericamente com a obtida experimentalmente em um período compreendido entre 01 de junho e 31 de julho, no compartimento Z1-Sala de estar, em regime de livre flutuação da temperatura do ar;

- Temperatura do ar interior na estação de Verão - Compara-se a temperatura nas mesmas condições adotadas na estação de inverno, em um período compreendido entre 01 de janeiro e 15 de maio, no compartimento Z1-Sala de estar, também em regime de livre flutuação da temperatura do ar.

6.4.1. TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR INTERIOR – INVERNO

Para a validação do modelo numérico adotado durante a estação de inverno, considerou-se a temperatura do ar interior de uma zona térmica de simulação Z1 – “Sala de Estar”. No período de tempo selecionado para validar o modelo durante a estação de inverno, a temperatura manteve-se em regime de livre flutuação sem meios mecânicos de aquecimento ou arrefecimento.

Na Fig. 77 apresenta-se a comparação dos resultados num período mais alargado dos registros da temperatura exterior, da temperatura simulada e da temperatura experimental no período utilizado para a validação do modelo numérico para a estação de inverno. O período utilizado para a validação do modelo foi o de 01 de Junho a 31 de Julho de 2015, considerado com o protótipo em serviço, ocupado por duas pessoas, nos períodos diurnos e noturnos, com maior frequência de ocupação nos períodos noturnos e frequência total nos finais de semana.

A Fig. 77 apresenta a comparação das três temperaturas comparadas para esta zona Z1-“Sala de Estar”.

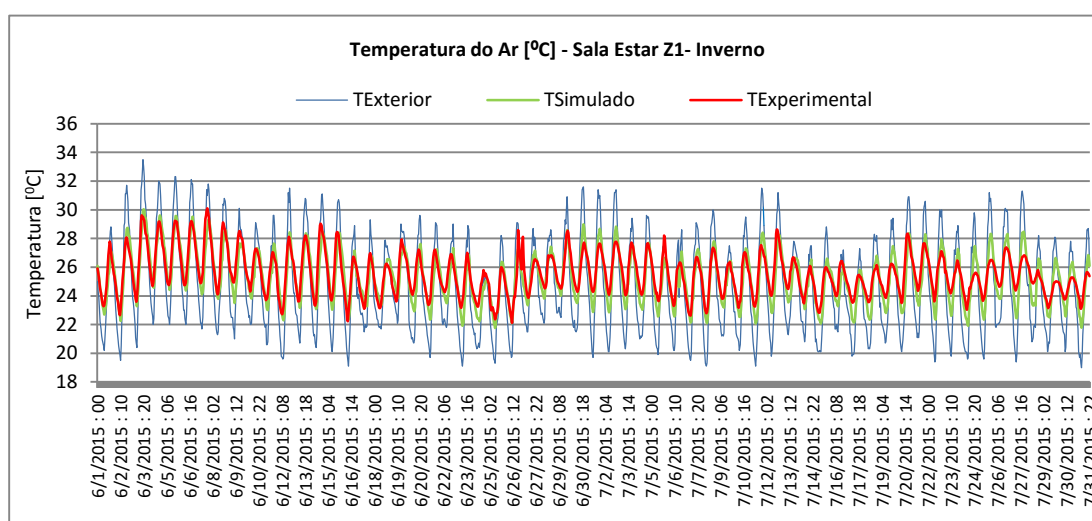


Fig. 77 Comparação entre valores medidos e numéricos-Z1-sala estar- Inverno- período de 01/06 a 31/07/2015

Na Fig. 78 ilustra a comparação para um período de tempo 01 a 19 de junho, dos registros de temperatura do ar interior experimental e os resultados de simulação. As curvas apresentadas mostram uma boa aproximação, apresentando uma diferença entre os valores médios e máximos muito próximos.

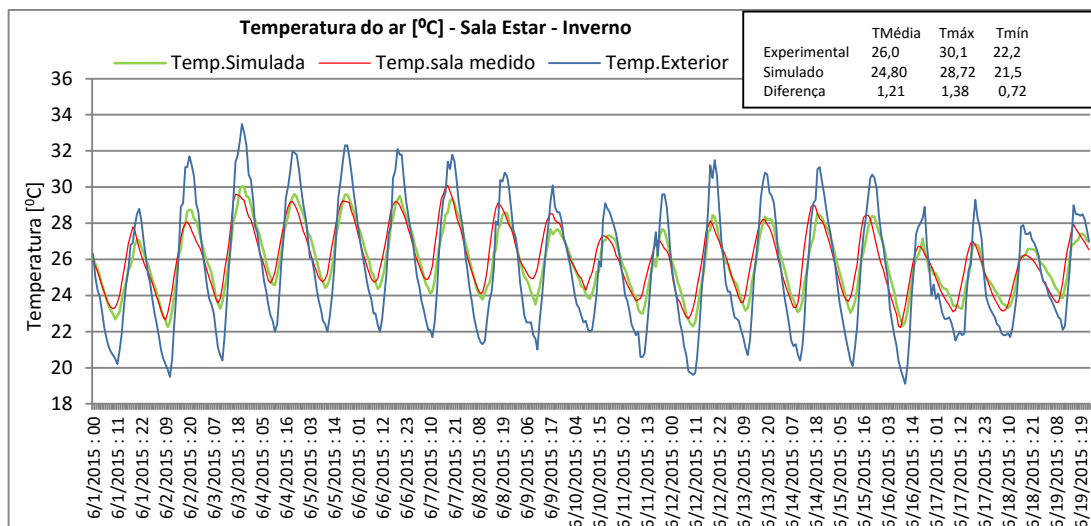


Fig. 78 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Inverno- período 01 a 19/06/2015

A Fig. 79 e a Fig. 80 - apresentam a comparação entre os resultados experimentais e numéricos para dois períodos mais curtos, entre os dias 01 e 06 de Junho de 2015 e 15 a 19 de Junho do mesmo ano, bem como uma análise comparativa para os mesmos períodos.

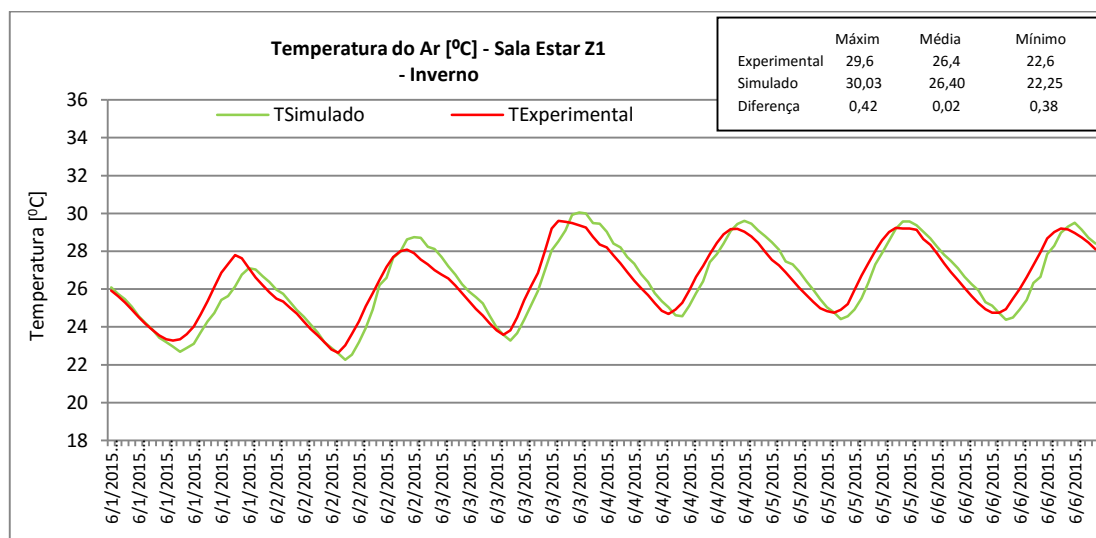


Fig. 79 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Inverno entre os dias 1 e 6 de Junho de 2015

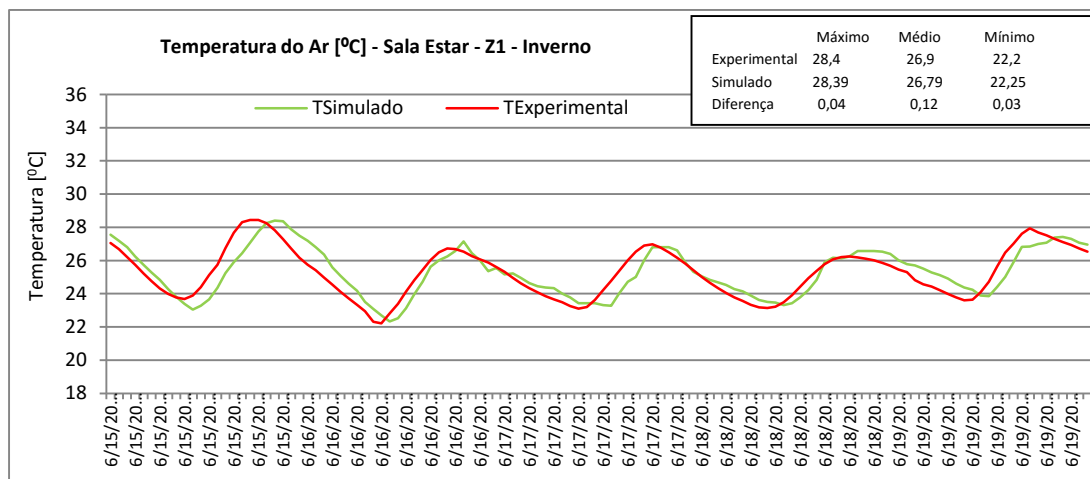


Fig. 80 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Inverno entre os dias 15 e 19 de Junho de 2015

Uma análise mais crítica dos gráficos das Fig. 79 e Fig. 80 -, referentes aos dois períodos analisados, permite constatar que os valores médios da temperatura experimental e simulada, têm uma aproximação considerável, sendo a diferença inferior a 0,15°C, para uma amplitude máxima registrada de 6°C.

A Fig. 81 ilustra a comparação dos registros de umidade relativa do ar interior medidos experimentalmente e simulados para a estação de inverno. Uma maior variabilidade entre estes valores não permitem o uso adequado para validação, embora haja similaridade entre as curvas.

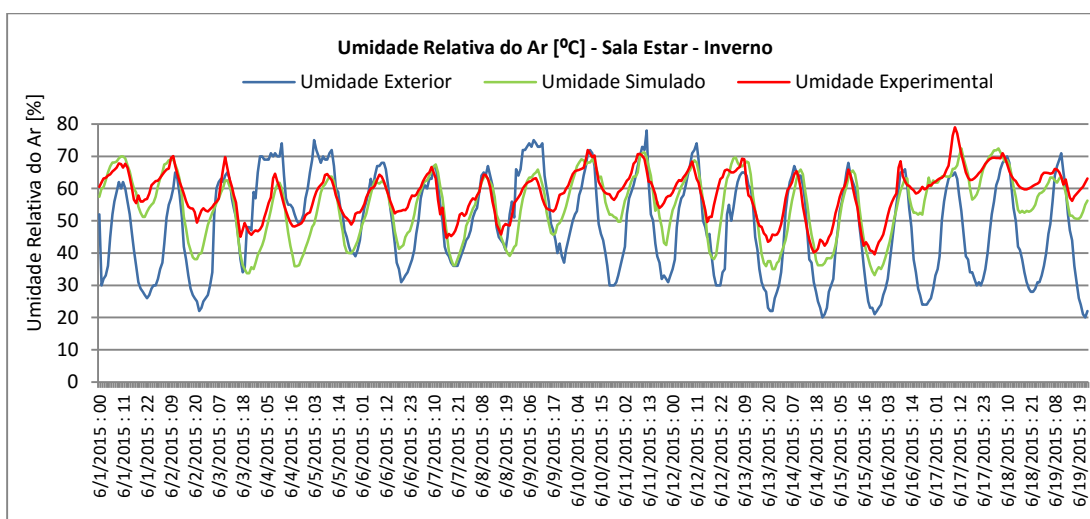


Fig. 81 - Comparação entre valores da umidade relativa do ar medida experimentalmente e simulado – Inverno – “Sala Estar” no período de 01/06 a 19/06/2015

6.4.2. TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR INTERIOR – VERÃO

A validação do modelo numérico na estação verão foi obtida similarmente ao procedimento adotado na estação do inverno, no mesmo compartimento da casa de gesso.

Na Fig. 82 são apresentados os três resultados da temperatura do ar exterior, da temperatura simulada e da temperatura medida experimentalmente para um período mais alargado, 01 de janeiro a 15 de maio,

para a zona térmica “Sala de Estar”. É possível constatar que os resultados experimentais e numéricos são muito próximos. Os registros de temperaturas simuladas e experimentais acompanham as variações da temperatura exterior, no entanto, estão sempre abaixo das temperaturas exteriores máximas e acima das mínimas.

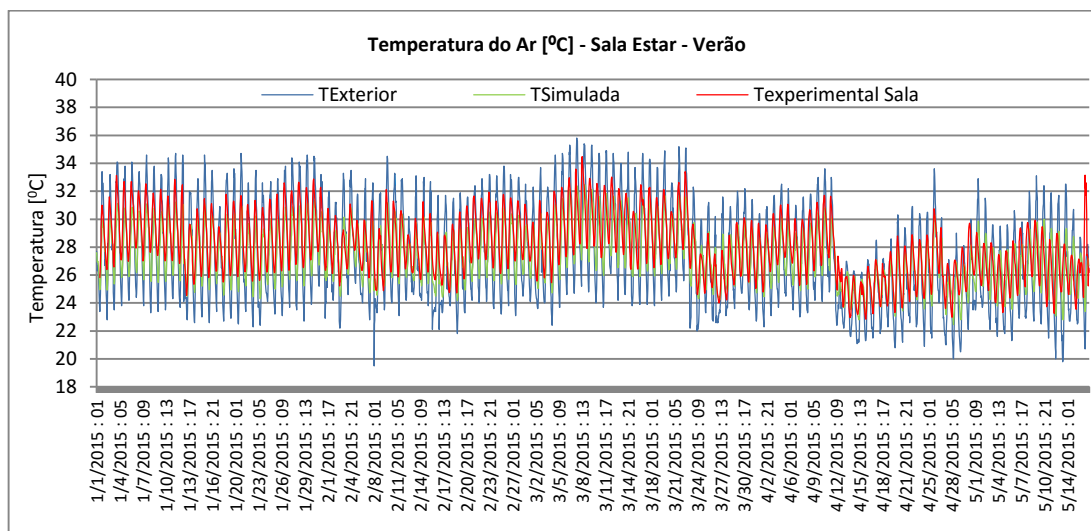


Fig. 82 - Comparação entre valores medidos e simulados para “Sala de Estar” – Verão no período de 01/01 a 15/05/2015

Na Fig. 83 são apresentados os registros da temperatura do ar simulada e medido experimentalmente para um período “mais curto”, 24 a 30 de janeiro. Os resultados demonstram que a temperatura experimental é mais elevada que a simulada, muito embora, para a temperatura média essa diferença é de 0,89°C e de 0,04 °C quando a análise é feita para a temperatura mínima.

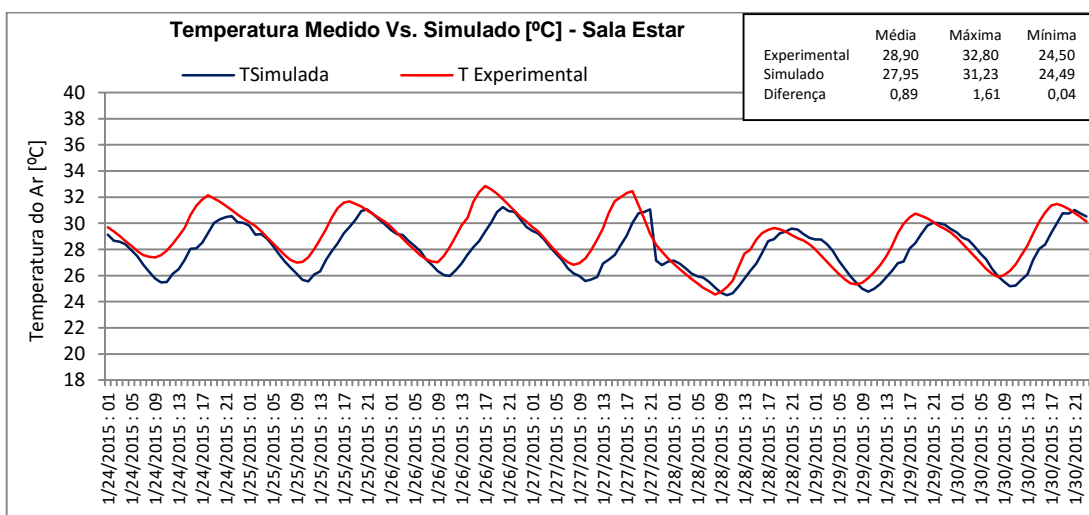


Fig. 83 - Validação do modelo numérico para “Sala de Estar” – Verão no período de 24/01 a 30/01/2015

A Fig. 84 ilustra a comparação dos registros da umidade relativa do ar exterior, do ar interior medido e simulado para a estação de verão. As curvas de umidade relativa experimental e simulada demonstram uma boa similaridade que permite servir como parâmetro de análise para validar o modelo, no entanto, como esta análise não se procedeu na estação de inverno, também não foi utilizada como variável determinante na estação de verão. Percebe-se uma variabilidade maior numa análise desta variável, no verão e no inverno, razão pela qual optou-se pela análise da temperatura do ar experimental e simulado para estudo do desempenho térmico da casa de gesso-tipo e validação do modelo.

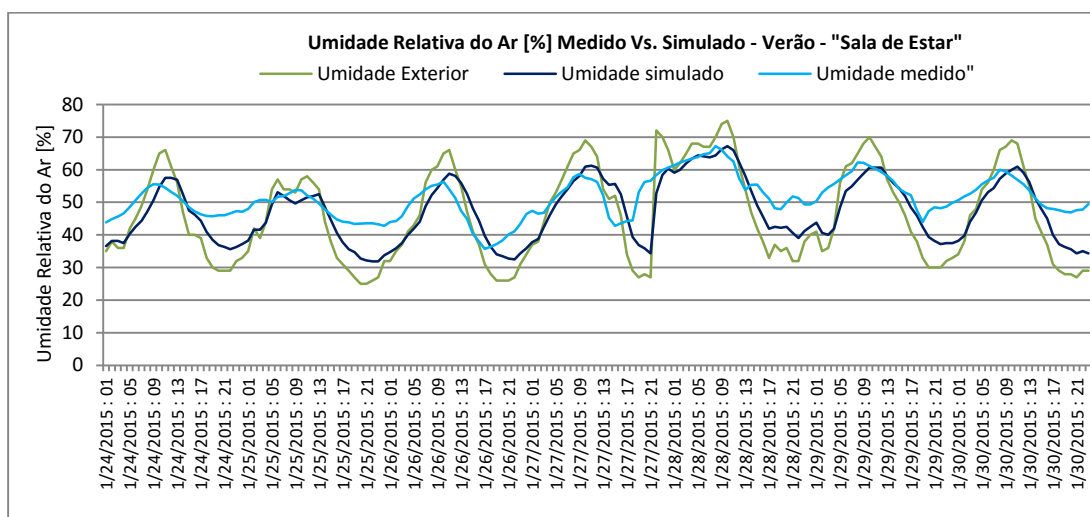


Fig. 84 - Comparação entre Valores de umidade relativa do ar – Verão- “Sala Estar”

Da análise dos registros de temperatura do ar interior experimentais e simulados, constata-se que, tanto na estação de inverno como na estação de verão, o modelo numérico apresenta uma boa previsão do comportamento térmico, para os dois períodos analisados.

Face aos resultados obtidos, é possível afirmar que o programa de simulação térmica WUFIPlus constitui um software com confiabilidade para o desenvolvimento do estudo de sensibilidade que será apresentado no capítulo seguinte.

6.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de validação do modelo numérico utilizado para o edifício-tipo em estudo permitiu que fosse possível esboçar as seguintes conclusões:

- Em termos médios a diferença entre a temperatura do ar interior das medições experimentais e da simulação é inferior a $0,8^{\circ}\text{C}$ no verão e $0,12^{\circ}\text{C}$ no inverno;
- Na estação de inverno, a aproximação dos registros de temperatura do ar interior medida experimentalmente e dos resultados do modelo numérico, são muito próximas. A diferença encontrada nos valores máximos e mínimos, em média, é da ordem $0,03^{\circ}\text{C}$;
- Na estação de Verão, os valores medidos e simulados também são próximos. Comparando-se as temperaturas mínimas, a diferença de registro experimental e simulado é da ordem de $0,04^{\circ}\text{C}$;

- Tendo um modelo validado, estão criadas as condições para explorar as potencialidades do software WUFIPlus, visando a sua aplicabilidade a um estudo de sensibilidade, que constitui um dos objetivos cruciais nesta Tese.

Refira-se que este modelo de simulação numérico já tinha sido validado por Jerónimo [62] e Cláudia Ferreira [89] usando-o em estudos de avaliação do desempenho higrotérmico de edifícios rurais reabilitados e de museus respectivamente.

7.

ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO TÉRMICO, ENERGÉTICO E DO CONFORTO DE CASAS DE GESSO

7.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Na sequência do estudo de validação do modelo de simulação numérica da casa de gesso-tipo, caracterizada no capítulo 5, foi desenvolvido um estudo de sensibilidade com recurso à simulação numérica em 4 cidades do Brasil (Petrolina, São Paulo, Curitiba e Recife), representativas de 4 zonas bioclimáticas no território nacional, a saber: Zona 7; 3;1 e 8, respectivamente. O estudo de sensibilidade tem como objetivos cruciais, avaliar o conforto térmico e a eficiência energética em dois cenários selecionados, tendo-se para isso que:

- Avaliar os parâmetros que condicionam o estudo proposto;
- Encontrar uma combinação de parâmetros no estudo capazes de influenciar o conforto térmico e a eficiência energética;
- Estudar diferentes climas e o comportamento da casa de gesso-tipo para esses climas;
- Selecionar dois cenários críticos: “Melhor cenário” e “Pior cenário”.

Para desenvolver o estudo de sensibilidade, foi proposto a seguinte metodologia:

- Elaborou-se uma árvore de cenários de simulação obtidos pela combinação de 4 parâmetros que pudesse condicionar o desempenho térmico do edifício: U_{parede} , $U_{\text{cobertura}}$, ventilação noturna (R_{ph}) e fator solar dos envidraçados ($FS_{o/g\perp}$);
- Foram considerados 54 casos de simulação numérica, representativos de situações limites;
- Aplicou-se o software WUFIPlus, validado no capítulo 6;
- Para desenvolver o estudo de sensibilidade, efetuou-se um estudo da temperatura do ar interior nas duas estações, inverno e verão;
- Elaborou-se dois indicadores de desconforto térmico passivos de inverno e verão, IDTP-I e IDTP-V, visando calcular o desconforto em graus-hora ($^{\circ}\text{C.h}$) para uma temperatura de conforto de 25°C no verão, e 20°C no inverno;
- Calcular a energia de arrefecimento necessária para a obtenção de conforto, tendo como referência uma temperatura de conforto de 25°C , em 4 cidades brasileiras;
- Finalmente, foi desenvolvido um estudo comparativo do desempenho térmico e do consumo energético do “Melhor cenário” e do “Pior cenário”. Foram quantificados os indicadores de desempenho térmico passivo e feito uma representação gráfica no mapa do território brasileiro.

Na Tabela 32 define-se a metodologia seguida para avaliar a influência dos 4 parâmetros no estudo de sensibilidade, em que se indica a variação considerada.

Tabela 32 - Procedimento metodológico de avaliação da influência dos parâmetros no estudo de sensibilidade.

Metodologia de estudo para o Inverno e Verão				
	Ventilação	Fator Solar	U _{parede}	U _{cobertura}
Influência da Cobertura	3 valores	3 valores	2 valores	-
Influência da Ventilação Noturna	-	3 valores	2 valores	3 valores
Influência do Fator Solar	3 valores	-	2 valores	3 valores

A utilização de modelos avançados de simulação numérica visando quantificar o desempenho térmico em função do clima e da envoltória exterior dos edifícios, tem tido uma grande evolução, hoje é uma via fundamental para o estudo do desempenho térmico dos edifícios. Este estudo faculta a possibilidade de compreender os benefícios oriundos da boa utilização de intervenções que possibilitem melhores níveis de conforto e baixos consumos energéticos.

No presente estudo, pretende-se avaliar a importância de isolar ou não a envolvente, e de usar a ventilação e a proteção solar de uma residência unifamiliar construída em blocos de gesso na região nordeste do Brasil, bem como estender o estudo a outras regiões com climas diferenciados, como é o caso de São Paulo, Recife e Curitiba.

As necessidades de aquecer ou arrefecer uma habitação podem variar, entre outros, com os seguintes aspectos [109]:

- A orientação dos edifícios;
- A localização dos edifícios;
- O sombreamento dos envidraçados;
- A ventilação noturna;
- O coeficiente de transmitância térmica da envoltória, cobertura e parede.

No estudo de sensibilidade desenvolvido, manteve-se a orientação fixa do edifício, com a fachada (alçado) principal voltada à Norte. Essa orientação obteve na simulação dinâmica os melhores resultados para o desempenho da casa de gesso.

Os cálculos a seguir apresentados no estudo de sensibilidade foram efetuados para uma habitação com uma área ocupada de 116m² e um volume habitável de 324,8m³.

A escolha da temperatura de 25°C prende-se com as condições de conforto do local de medição da casa de gesso.

As análises para a avaliação e quantificação do desempenho térmico, organizam-se da seguinte forma:

- No subcapítulo 7.2.1 apresenta-se a árvore de simulação obtida por ocasião do cruzamento dos diversos parâmetros em estudo na casa de gesso;
- No subcapítulo 7.2.2 apresenta-se na Tabela 33, os 54 cenários de simulação obtidos do cruzamento na árvore, dos parâmetros estudados no desempenho térmico da casa de gesso nas 4 cidades;
- No subcapítulo 7.2.3 é apresentado um estudo de exposição anual do clima nas 4 cidades;

- No subcapítulo 7.2.4 apresenta-se um conjunto de 10 cenários críticos, ditos condicionantes, com os 4 parâmetros determinantes, representativos da grelha maior de 54 cenários;
- No capítulo 7.3 são apresentados os resultados de avaliação do desempenho térmico, do conforto e da eficiência energética, no verão, para as cidades de Petrolina, São Paulo, Curitiba e Recife. Ao final do capítulo em 7.3.5, expõe-se graficamente a influência da localização em uma análise para as 4 cidades estudadas;
- No Capítulo 7.4 estuda-se o consumo energético na estação do verão para as cidades de Petrolina, São Paulo, Recife e Curitiba. Ao final do capítulo em 7.4.5, expõe-se graficamente a influência da localização em uma análise para as 4 cidades estudadas;
- No Capítulo 7.5. estuda-se o Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Verão (IDTP – V) para as cidades de Petrolina, São Paulo, Recife e Curitiba. Ao final do capítulo em 7.5.5, expõe-se graficamente a influência da localização em uma análise para as 4 cidades estudadas;
- No Capítulo 7.6 estuda-se o consumo energético na estação do inverno para as cidades de Petrolina, São Paulo, Recife e Curitiba. Ao final do capítulo em 7.6.5, expõe-se graficamente a influência da localização em uma análise para as 4 cidades estudadas;
- No Capítulo 7.7. estuda-se o Indicador de Desconforto Térmico Passivo de inverno (IDTP – I) para as cidades de Petrolina, São Paulo, Recife e Curitiba. Ao final do capítulo em 7.7.5, expõe-se graficamente a influência da localização em uma análise para as 4 cidades estudadas;

Recorreu-se à utilização do software de simulação avançado WUFI PLUS para desenvolver um estudo de sensibilidade para o edifício construído em blocos de gesso.

O que se pretende no estudo de sensibilidade aqui desenvolvido é:

- Quantificar os efeitos das alterações da transmitância térmica da envoltória exterior (paredes e cobertura) no conforto térmico e no consumo energético nas estações de inverno e verão;
- Quantificar os efeitos trazidos pelo incremento da ventilação noturna como estratégia de arrefecimento passivo no verão e no inverno nos diversos climas brasileiros;
- Quantificar os efeitos da alteração do fator solar dos envidraçados e sua influência no desempenho térmico na casa de gesso.
- Calcular o desconforto térmico recorrendo ao modelo adaptativo ASHRAE 55 e de dois Índices de Desconforto Térmico Passivo –IDTP, desenvolvido para o estudo nas duas estações, inverno e verão. (IDTP-I e IDTP-V);
- Calculou-se a energia de resfriamento necessária para a obtenção do conforto, tendo como referência uma temperatura de 25°C no verão nas 4 cidades simuladas.

7.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

7.2.1. ÁRVORE DE SIMULAÇÃO

Para o desenvolvimento deste capítulo foi necessário desenvolver um esquema de simulação em árvore (Fig. 85), que pudesse articular o cruzamento dos diversos parâmetros térmicos influenciadores do desempenho da casa de gesso, o que conduziu à obtenção de uma grelha de cenários representados na Tabela 33. A combinação entre os parâmetros considerados no estudo de sensibilidade conduziu à obtenção de um conjunto de 54 cenários de simulação.

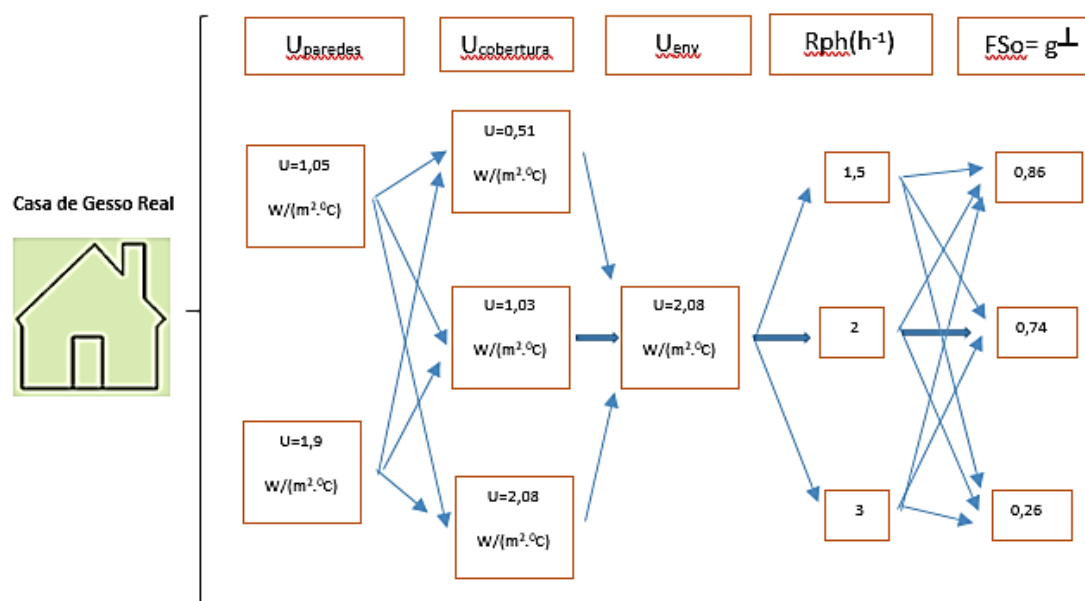


Fig. 85 - Esquema em árvore para estudo de sensibilidade

Os valores apresentados para transmitância térmica de paredes e coberturas na árvore de simulação da Fig. 85, são admitidos nas normas NBR 15220-3 e NBR 15575.

7.2.2. CENÁRIOS OBTIDOS NA ÁRVORE

Na Tabela 33, é apresentado o resultado do cruzamento dos parâmetros analisados na casa de gesso-tipo nos 54 cenários resultantes da árvore da Fig. 85.

Tabela 33 - Cenários obtidos para o estudo de sensibilidade

Cenário	Uparedes $W/(m^2.C)$	Ucobertura $W/(m^2.C)$	$R_{ph}(h^{-1})$	$g^L = F_{So}$
1	1,05	0,51	1,5	0,86
2	1,05	0,51	1,5	0,74
3	1,05	0,51	1,5	0,26
4	1,05	0,51	2	0,86
5	1,05	0,51	2	0,74
6	1,05	0,51	2	0,26
7	1,05	0,51	3	0,86
8	1,05	0,51	3	0,74
9	1,05	0,51	3	0,26
10	1,05	1,03	1,5	0,86
11	1,05	1,03	1,5	0,74
12	1,05	1,03	1,5	0,26
13	1,05	1,03	2	0,86
14	1,05	1,03	2	0,74

Cenário (continuação)	Uparedes W/(m ² .c)	Ucobertura W/(m ² .c)	Rph(h-1)	g _L =FSt
15	1,05	1.03	2	0.26
16	1,05	1.03	3	0.86
17	1,05	1.03	3	0.74
18	1,05	1.03	3	0.26
19	1,05	2.08	1.5	0.86
20	1,05	2.08	1.5	0.74
21	1,05	2.08	1.5	0.26
22	1,05	2.08	2	0.86
23	1,05	2.08	2	0.74
24	1,05	2.08	2	0.26
25	1,05	2.08	3	0.86
26	1,05	2.08	3	0.74
27	1,05	2.08	3	0.26
28	1.9	0.51	1.5	0.86
29	1.9	0.51	1.5	0.74
30	1.9	0.51	1.5	0.26
31	1.9	0.51	2	0.86
32	1.9	0.51	2	0.74
33	1.9	0.51	2	0.26
34	1.9	0.51	3	0.86
35	1.9	0.51	3	0.74
36	1.9	0.51	3	0.26
37	1.9	1.03	1.5	0.86
38	1.9	1.03	1.5	0.74
39	1.9	1.03	1.5	0.26
40	1.9	1.03	2	0.86
41	1.9	1.03	2	0.74
42	1.9	1.03	2	0.26
43	1.9	1.03	3	0.86
44	1.9	1.03	3	0.74
45	1.9	1.03	3	0.26
46	1.9	2.08	1.5	0.86
47	1.9	2.08	1.5	0.74
48	1.9	2.08	1.5	0.26
49	1.9	2.08	2	0.86
50	1.9	2.08	2	0.74
51	1.9	2.08	2	0.26
52	1.9	2.08	3	0.86
53	1.9	2.08	3	0.74
54	1.9	2.08	3	0.26

7.2.3. INFLUÊNCIA DO CLIMA

Nesta fase são apresentados os dados referentes às simulações da casa de gesso-tipo para 4 cidades brasileiras (Fig. 86). A escolha por 4 cidades inclui o estudo em 4 diferentes zonas bioclimáticas e climas diferenciados. A cidade de Petrolina, situada no estado de Pernambuco, encontra-se localizada na zona bioclimática 7 e constitui o local de estudo do protótipo.

A cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco, foi objeto de estudo nesta tese com a finalidade de demonstrar o desempenho térmico do protótipo em diferentes zonas bioclimáticas situadas dentro de um mesmo estado, com climas diferenciados. Recife está situado na zona Bioclimática 8.



Fig. 86 - Localização das cidades estudadas no Brasil

Para além de Petrolina-PE e Recife-PE, o estudo estende-se a mais 2 cidades do Brasil, São Paulo-SP e Curitiba-PR, cuja intenção é a de avaliar mais duas zonas bioclimáticas, zona 3 e 1, respectivamente. O estudo da casa de gesso em 4 cidades selecionadas tem por fim contemplar a análise em 3 regiões geográficas diferentes, Nordeste, Sul e Sudeste, 3 estados, PE, SP e PR e 4 zonas bioclimáticas diferentes, visando estudar o desempenho térmico e o conforto do protótipo nas principais regiões do país.

A Tabela 34 exemplifica as cidades em estudo nesta tese com suas respectivas localizações por região e clima predominante segundo a classificação de Köppen [105].

Tabela 34 - Cidades adotadas nas simulações de avaliação do desempenho térmico da casa de gesso

Cidade	Zona Bioclimática	Região	Clima Predominante
Petrolina-PE	7	Nordeste	BSwh*
Recife-PE	8	Nordeste	Clima de monção
São Paulo-SP	3	Sudeste	Clima temperado úmido com inverno seco e verão quente
Curitiba-PR	1	Sul	Cfb-Clima Subtropical Úmido (Mesotérmico)

Segundo a classificação de Köppen, o clima no Município de Petrolina é BSwh, ou seja, seco, vegetação xerófila, inverno seco e temperatura no mês mais frio, apresentando uma média superior a 18°C. A temperatura média anual é de 26,0 °C. A precipitação média anual é de 521,5 mm.

A utilização de um software de simulação higrotérmica requer ficheiros climáticos precisos para que se possa de forma o mais real possível estabelecer condições satisfatórias de conforto e levantamento das necessidades energéticas em edificações. Nesta Tese, para estabelecer resultados de conforto e necessidades energéticas do edifício estudado em Petrolina e nas cidades de Recife/PE, São Paulo/SP e Curitiba/PR, foram utilizados ficheiros climáticos em formato TRY (Test Reference Year) e disponibilizados pelo LABEEE- Laboratório de Eficiência Energética em Edifícios da UFSC. Salienta-se que estes ficheiros climáticos já são usados no Brasil em estudos análogos.

As Fig. 87 a Fig. 90 apresentam para as 4 cidades em estudo, a média diária da temperatura do ar e umidade relativa do ar exterior.

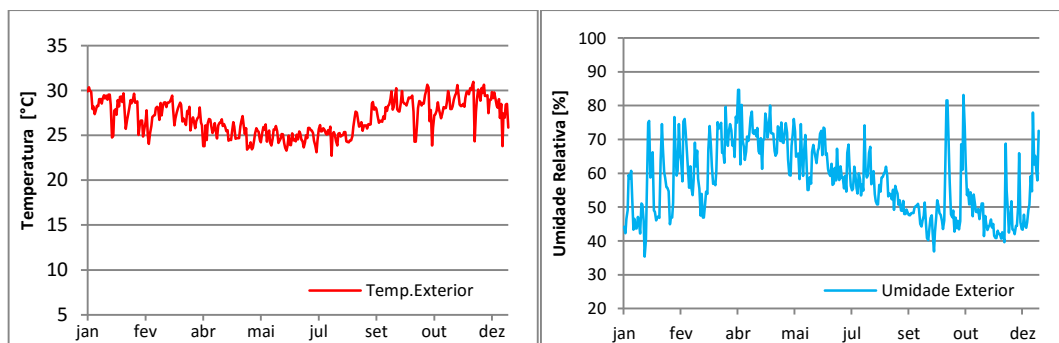


Fig. 87 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média diária exterior para Petrolina - 2015

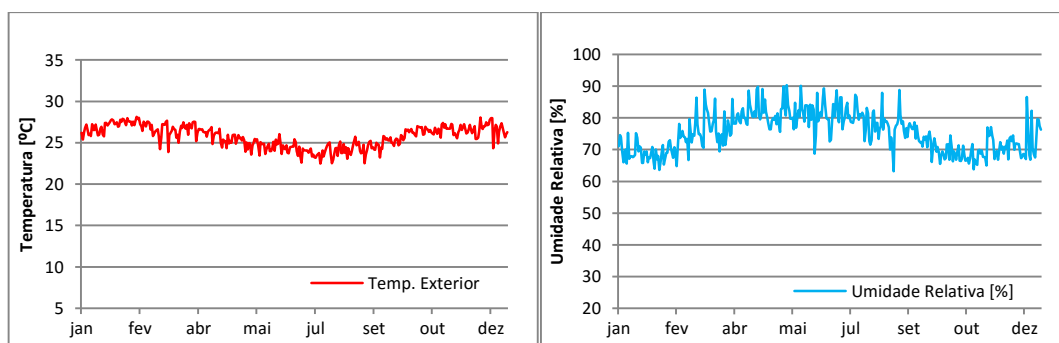


Fig. 88 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média diária exterior para Recife - 2015

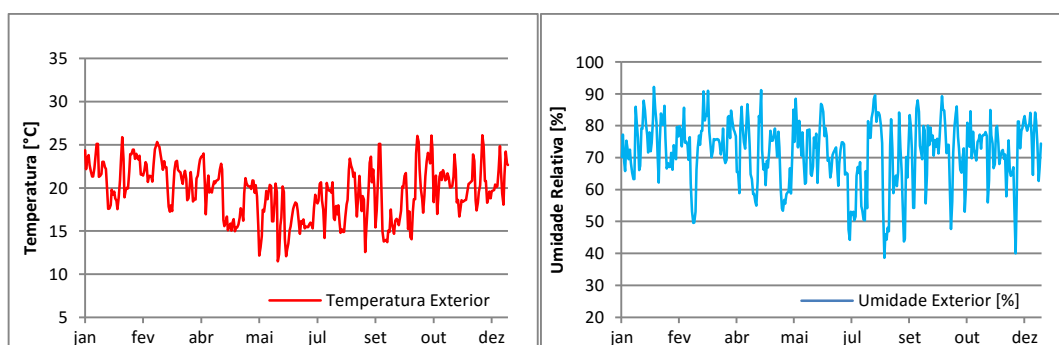


Fig. 89 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média exterior para São Paulo – 2015

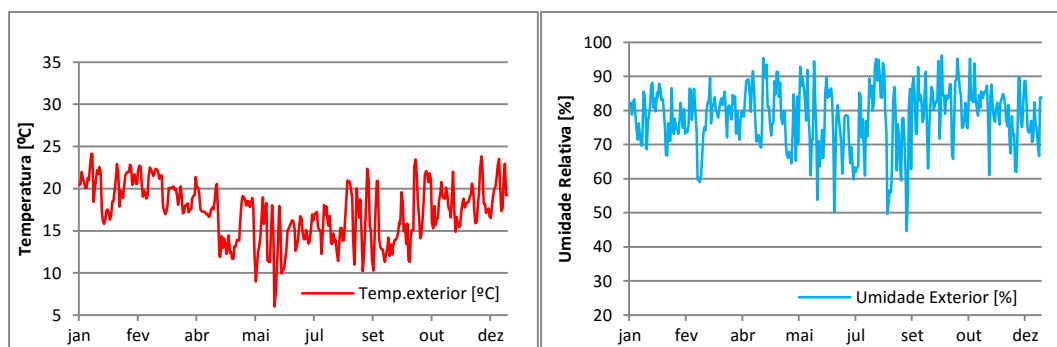


Fig. 90 - Temperatura do ar e Umidade Relativa média exterior para Curitiba – 2015

Na Tabela 35 são apresentados os valores médios, máximos e mínimos de temperatura diária e umidade relativa do ar média diária para as cidades em estudo nas estações de verão e inverno.

Tabela 35 - Valores máximos, médios e mínimos diários de temperatura e umidade do ar para as 4 cidades estudadas

Variável Climática	Petrolina		Recife		São Paulo		Curitiba	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
Temp.Média [°C]	25,76	27,49	24,34	26,47	17,51	20,60	14,83	18,54
Temp. Máxima [°C]	30,25	30,97	26,06	28,09	25,09	26,10	22,35	24,15
Temp.Mínima [°C]	22,73	23,41	22,48	23,95	11,49	12,15	6,04	8,97
U.R Média [%]	57,03	58,57	78,62	73,55	69,32	72,89	76,29	79,26
U.R. Máxima [%]	74,54	84,67	90,12	90,29	89,54	92,12	95,12	96,12
U.R Mínima [%]	36,87	35,37	63,21	63,54	38,62	40,04	44,67	58,96

7.2.4. PARÂMETROS CONSIDERADOS NO ESTUDO

Os 4 parâmetros (U_{parede} , $U_{\text{cobertura}}$, Ventilação noturna e Fator solar de envidraçados) são determinantes e essenciais no estudo do desempenho da casa de gesso-tipo.

Na sequência da análise dos resultados obtidos, selecionou-se um conjunto de 10 cenários designados cenários críticos. Esses cenários passaram a representar a totalidade dos 54 cenários (Tabela 33).

Os 10 cenários estudados estão identificados na Tabela 36, bem como os valores dos parâmetros considerados por cenário de simulação, e suas respectivas variações no decorrer do estudo.

Tabela 36 - Cenários críticos considerados para o estudo de sensibilidade e valores adotados

Cenário	U_{parede}^1 W/m ² .°C	$U_{\text{cobertura}}^2$ (W/m ² .°C)	RPH [h ⁻¹]	Fator Solar Envidraçados ³ Fso/g [⊥] [-]
3	1.05	0.51	1.5	0.26
6	1.05	0.51	2.0	0.26
9	1.05	0.51	3.0	0.26
15	1.05	1.03	2.0	0.26
18	1.05	1.03	3.0	0.26
46	1.9	2.08	1.5	0.86
47	1.9	2.08	1.5	0.74
49	1.9	2.08	2.0	0.86
50	1.9	2.08	2.0	0.74
52	1.9	2.08	3.0	0.86

Escolhidos os 10 cenários críticos, foi possível identificar a situação mais favorável e a menos favorável, que passamos a identificar como “Melhor cenário” e “Pior cenário”.

- O Cenário 9, corresponde a temperaturas interiores mais amenas, que passa-se a identificar como “Melhor cenário”;
- O Cenário 46, corresponde a temperaturas do ar interior mais elevadas, que passa-se a identificar como “Pior cenário”.

A título de exemplo, é possível identificar o “Melhor cenário” e o “Pior cenário” para a cidade de São Paulo (Fig. 91-).

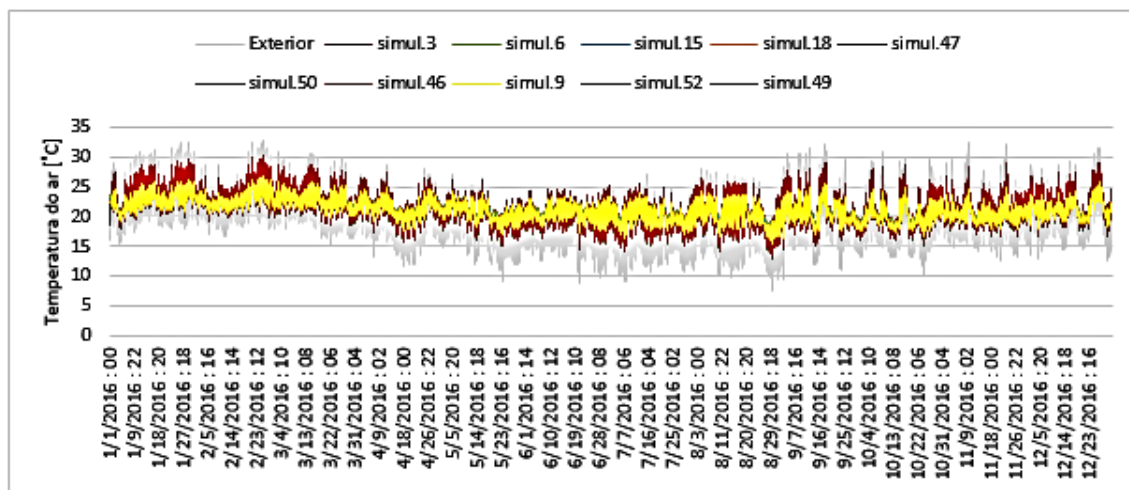


Fig. 91- Variação da temperatura do ar interior para os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” em São Paulo

¹ O valor do parâmetro, U_{parede} , considerados para a fachada opaca, são admitidos pela NBR 15220-2, caracterizando valores máximos admissíveis.

² O valor do parâmetro, $U_{\text{cobertura}}$, considerados para a cobertura, são admitidos pela NBR 15220-2, caracterizando valores máximos admissíveis para coberturas isoladas e pesadas.

³ O valor do parâmetro Fator Solar de envidraçados, g_{\perp} , corresponde ao fator solar do vão envidraçado composto por vidro simples incolor (0,86), vidro duplo (exterior + Interior) incolor 4 a 8mm + incolor 5mm (0,74) e vidro refletivo (0,26).

Estes dois cenários, “Melhor cenário” e “Pior cenário”, serão neste capítulo os cenários críticos condicionantes na avaliação do desempenho térmico e eficiência energética da casa de gesso.

7.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO, DO CONFORTO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO VERÃO

Quantificou-se os resultados de flutuação da temperatura do ar interior para Petrolina, São Paulo, Recife e Curitiba.

Numa primeira fase, procedeu-se à simulação da temperatura do ar interior nas 6 zonas térmicas determinadas na casa de gesso (Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 e Z6), no entanto, para que os resultados não tornasse o estudo alongado, procurou-se sintetizar os resultados das 6 zonas térmicas no cálculo médio da temperatura do ar interior que pudesse representar a temperatura interior de casa de gesso-tipo.

Seguidamente, desenvolveu-se um estudo de sensibilidade para os 2 cenários selecionados no capítulo 7.2.4, “Melhor cenário” e “Pior cenário”, em 4 cidades brasileiras, com a finalidade de avaliar o desempenho térmico, o conforto térmico e a eficiência energética da casa de gesso, no inverno e no verão.

Sendo o conforto térmico, um estado sensitivo dependente de variáveis como a temperatura do ar, velocidade do ar, umidade relativa, nível de atividade envolvida e vestuário dos usuários, na presente Tese, a temperatura do ar interior será considerada como variável determinante nos cálculos do conforto térmico interior. Com base no contexto, assume-se que o estudo de sensibilidade fica centrado nos valores desse parâmetro interior, resultante da média calculada entre as 6 zonas térmicas atribuídas na casa de gesso-tipo.

O estudo do conforto térmico para as cidades escolhidas no território brasileiro foi determinado à luz da norma ASHRAE 55 [63], Recorreu-se também a um estudo prévio das curvas de frequência acumulada e determinação dos valores estatísticos máximos e mínimos da temperatura interior nas estações de inverno e verão.

Para quantificar os custos e demanda energética da casa de gesso-tipo, considerou-se um sistema de arrefecimento para uma temperatura de conforto de 25°C.

Os resultados são apresentados comparando-se os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário”. Cada um dos parâmetros (U_{parede} , $U_{cobertura}$, ventilação noturna e fator solar de envidraçados) é analisado por um estudo de influência individualmente, levando em consideração o isolamento, ou não, nas paredes e cobertura, segundo o procedimento metodológico na Tabela 32 no capítulo 7.1.

7.3.1. PETROLINA

7.3.1.1. Desempenho térmico no verão para Petrolina

A análise da temperatura do ar interior é importante para se quantificar as necessidades e os efeitos do isolamento ou não de paredes e cobertura, da ventilação e do fator solar dos vãos envidraçados e suas implicações no ambiente interior.

A temperatura do ar interior, corresponde à média da temperatura do ar interior das 6 zonas térmicas de simulação, representada no gráfico da Fig. 92.

A Fig. 92 apresenta os resultados da variação da temperatura do ar interior para Petrolina durante o verão, com duração de 8 meses (5832 horas).

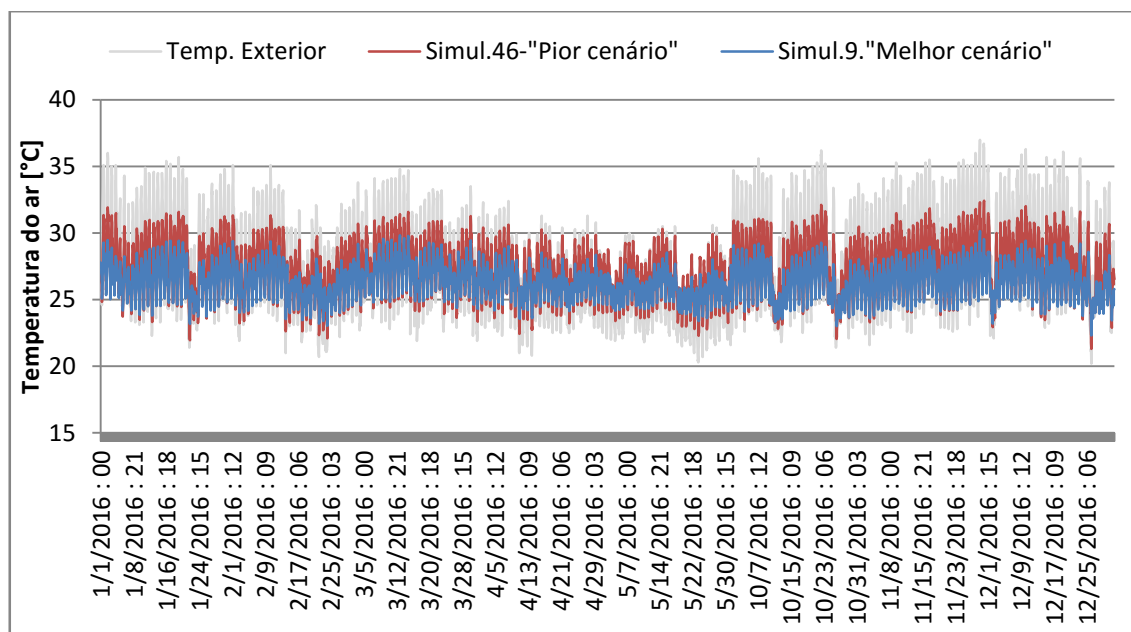


Fig. 92 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade de Petrolina.

A análise dos resultados obtidos por simulação permite concluir de forma global o seguinte:

- Há uma necessidade corrente de isolar as coberturas no Brasil. Essa alteração no isolamento da cobertura obtido nas simulações pode apresentar uma significativa redução na temperatura do ar interior na ordem de até 2,2°C;
- Para uma temperatura de conforto de 25 °C é necessário recorrer a um sistema artificial de arrefecimento em quase toda a estação de verão, para a cidade em estudo;
- O Isolamento da cobertura para esse tipo de edificação pode garantir benefícios na redução da temperatura média do ar interior, em termos médios, da ordem de 2,3°C, para um percentil de temperatura de 95%;
- Todos os cenários estudados para o clima de Petrolina situam a temperatura média entre 1,3 °C e 2,2 °C acima da temperatura referência de 25 °C;
- Entre os cenários 9-cob.isolada-3.0Rph e 46-Cob.sem.isolam-1,5Rph, há uma diferença de temperatura entre as máximas de 7,6%, melhor para o cenário 9. Isso se deve ao fato do isolamento da cobertura e paredes neste cenário, aliado a uma alta taxa de ventilação.

Na Tabela 37 são apresentados os resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão.

Tabela 37 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários estudados para a cidade de Petrolina.

Cenário	Simul. 9-“Melhor cenário”- cob.isolada+ parede isolada-3.0Rph	Simul.46 –“Pior cenário”- cob. e parede sem isolamento-1.5 Rph
Temp.> 25°C	5050h (86,59%)	5072h (86,96%)
Máxima	30,14	32,44
Média	26,32	27,31
Mínima	22,28	21,30
Quartil 25	25,50	25,74
Quartil 50	26,26	27,20
Quartil 75	27,12	28,85
Percentil 95%	28,29	30,60
Percentil 98%	28,66	31,02
Percentil 99%	28,96	31,32

Nos resultados apresentados para a temperatura do ar interior na Tabela 37, não se observa diferenças substanciais no quantitativo de horas com temperaturas acima dos 25°C para os dois casos analisados. O cenário com cobertura e paredes isoladas, “Melhor cenário”, apresenta uma temperatura máxima com registro de 2°C aproximadamente menor que a mesma temperatura para o cenário sem isolamento das paredes e cobertura. Em uma análise da simulação para “Pior cenário”, como era de se esperar, as temperaturas são sempre superiores ao “melhor cenário”, à exceção da temperatura mínima registrada.

A Fig. 93 ilustra a comparação das probabilidades acumuladas da temperatura do ar interior dos cenários estudados e apresentados na Tabela 37.

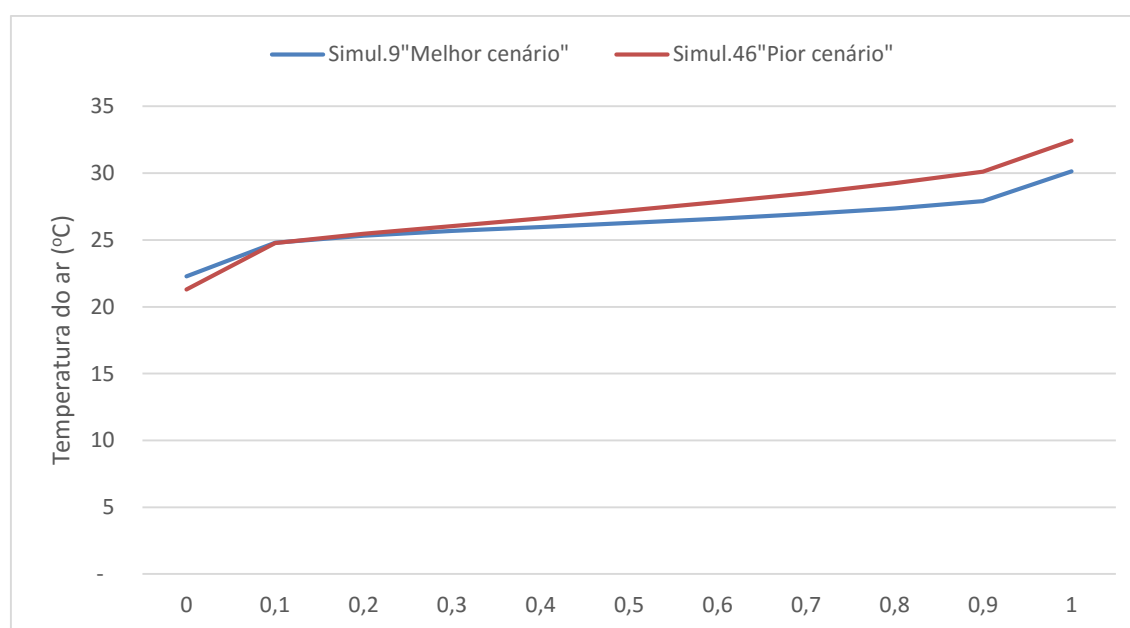


Fig. 93 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para Petrolina.

As curvas de probabilidade acumulada apresentadas na Fig. 93 mostram uma semelhança entre as temperaturas do ar interior analisadas para os dois cenários, até coincidentes entre os 10 e 20%, vindo a mostrar diferenças para os percentuais acima desses valores, sendo as temperaturas do “Pior cenário” sempre superiores ao observado para o “Melhor cenário”. O incremento da ventilação noturna não ofereceu benefícios no desempenho térmico da casa de gesso-tipo a se considerar.

Na Tabela 38 apresentam-se as temperaturas máximas para Petrolina.

Tabela 38 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários estudados em Petrolina.

Cen. 9-cob.Isol.+ 3.0 Rph-“Melhor cenário”	Cen. 46-cob.sem Isol.+ 1.5 Rph- “Pior cenário”	Diferença entre os cenários
30,14 °C	32,44 °C	2,3 °C

Em síntese, é possível constatar através dos resultados apresentados do desempenho térmico no verão, na cidade de Petrolina, que a temperatura do ar interior nos cenários simulados com isolamento térmico da cobertura é inferior aos das simulações sem isolamento térmico, o que conduz a uma diferença significativa e superior a 2°C, o que significa que a utilização de isolamento térmico na cobertura é capaz de proporcionar uma redução de mais de 7,0% na temperatura do ar interior.

Nos subcapítulos 7.3.1.2 a 7.3.1.4 expõe-se um estudo individual da influência de cada parâmetro simulado e suas implicações no desempenho térmico da casa de gesso para a cidade de Petrolina.

7.3.1.2. Influência do isolamento térmico da cobertura e paredes na temperatura do ar interior para Petrolina

São apresentados estudos comparativos da combinação da influência da transmitância térmica da cobertura e paredes no desempenho térmico da casa de gesso-tipo em três níveis de transmitância térmica para a cobertura ($U_{cobertura}=0,51 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; $U_{cobertura}=1,03 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $U_{cobertura}=2,08 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), e dois níveis de transmitância para a parede ($U_{parede}=1,05 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $U_{parede}=1,90 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). A análise da transmitância térmica em apenas dois níveis para as paredes, justifica-se pelo motivo de um valor para a transmitância das paredes de gesso superior a $1,90 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, implicaria numa espessura de parede inferior a 10 cm, inviabilizando a construção dessas paredes para a envoltória exterior nessa ordem de grandeza.

Cada um dos pontos representa as temperaturas dos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$ (Temperaturas iguais ou menores que a registrada para 50% e 95% dos registros) do ar interior da habitação e o seu respectivo valor correspondente de transmitância térmica.

Com relação à influência do U da cobertura no nível de desempenho da casa de gesso-tipo na estação de verão, Fig. 94, nota-se que a temperatura média interior varia gradualmente em função do aumento da transmitância térmica U , o que implica variação no nível de desempenho. Estes resultados indicam uma elevação de valores de temperatura de $1,64^\circ\text{C}$ entre a cobertura isolada totalmente e sem isolamento, (valor mínimo e máximo de U , respectivamente). Sendo assim, pode-se afirmar que o aumento dessa propriedade física da cobertura influencia no desempenho desse tipo de habitação, no verão, e pode apresentar ganhos de até $2,8^\circ\text{C}$ quando compara-se a temperatura para o percentil $T_{95\%}$ para Petrolina.

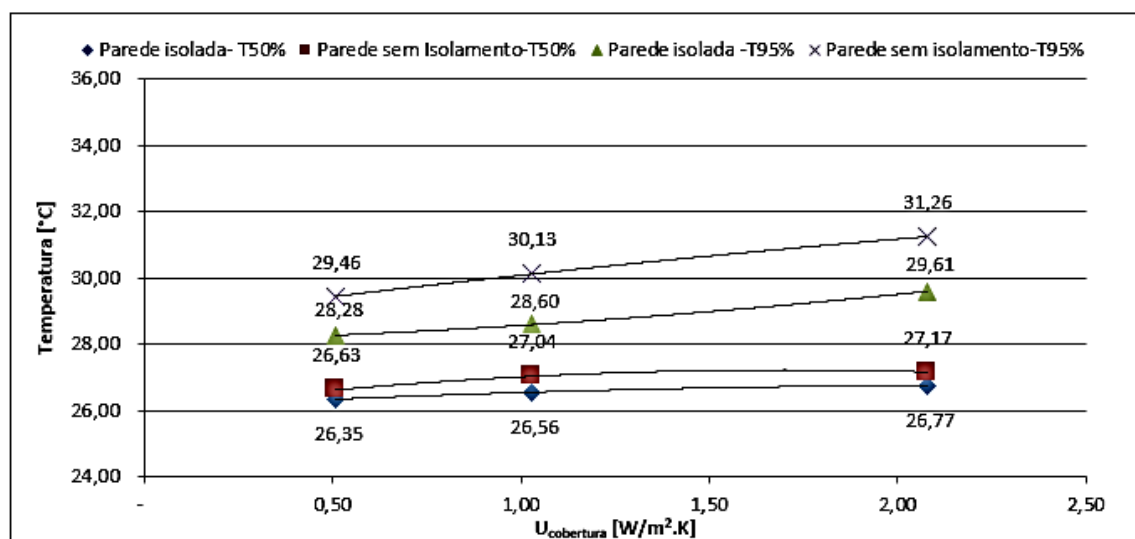


Fig. 94 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura do ar interior de verão para Petrolina.

Na Fig. 94, as curvas são crescentes, indicando que, ao diminuir o isolamento da cobertura, aumenta a temperatura média no interior da casa de gesso e, conseqüentemente, pior é o desempenho da habitação. No entanto, essa variação é quase nula quando se analisa as temperaturas do percentil $T_{50\%}$ para as paredes muito isoladas, sendo essa variação inferior a $0,5^{\circ}\text{C}$.

7.3.1.3. Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura interior de verão para Petrolina

Para avaliar a influência da ventilação noturna no desempenho térmico da casa de gesso-tipo, adotaram-se três níveis de ventilação noturna (1,5 Rph; 2Rph e 3Rph). Para o efeito, os casos apresentados (Fig. 95) mostram que para os dois cenários, a combinação da ventilação noturna com a parede isolada melhora a temperatura interior da casa de gesso em 1°C quando se analisa o percentil $T_{95\%}$, o que não ocorre quando a análise é feita para o percentil $T_{50\%}$, não havendo melhora entre isolar e não isolar as paredes. Também é possível concluir que a ventilação noturna para a análise isolada em cada percentil não provoca diminuição da temperatura interior da casa de gesso.

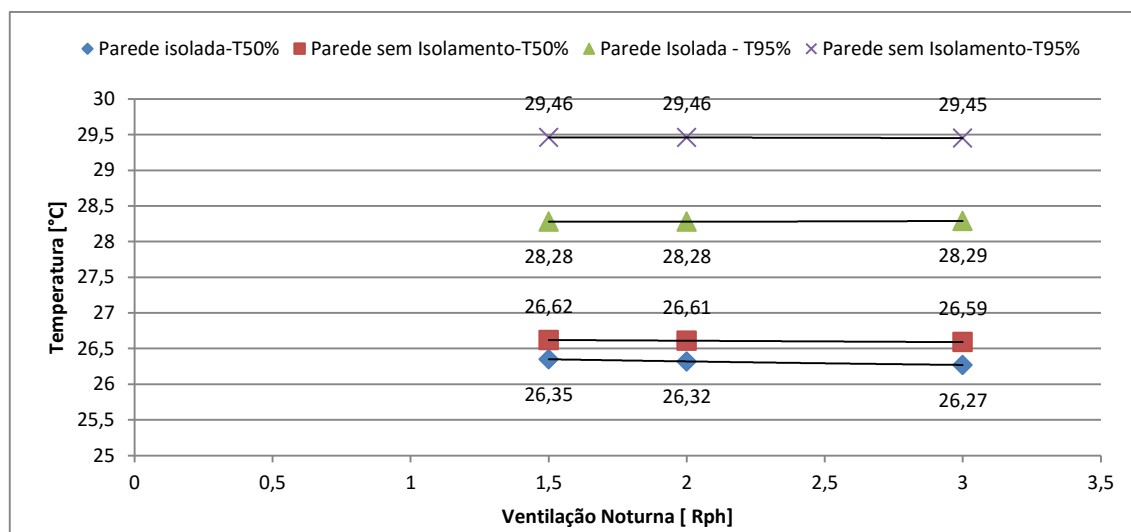


Fig. 95 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico de paredes no verão para Petrolina.

A diferença entre as temperaturas simuladas para o nível de ventilação 3Rph, para os cenários com paredes isoladas e sem isolamento situa-se na faixa de 3°C, o que se traduz num elevado nível de desconforto térmico.

7.3.1.4. Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Petrolina

Para avaliar a influência do fator solar de envidraçados no desempenho térmico da casa de gesso-tipo, adotaram-se três níveis de valores para este parâmetro, 0,86 que corresponde ao vidro simples, 0,74 correspondente ao vidro duplo e 0,26 correspondente ao vidro refletivo (Fig.96).

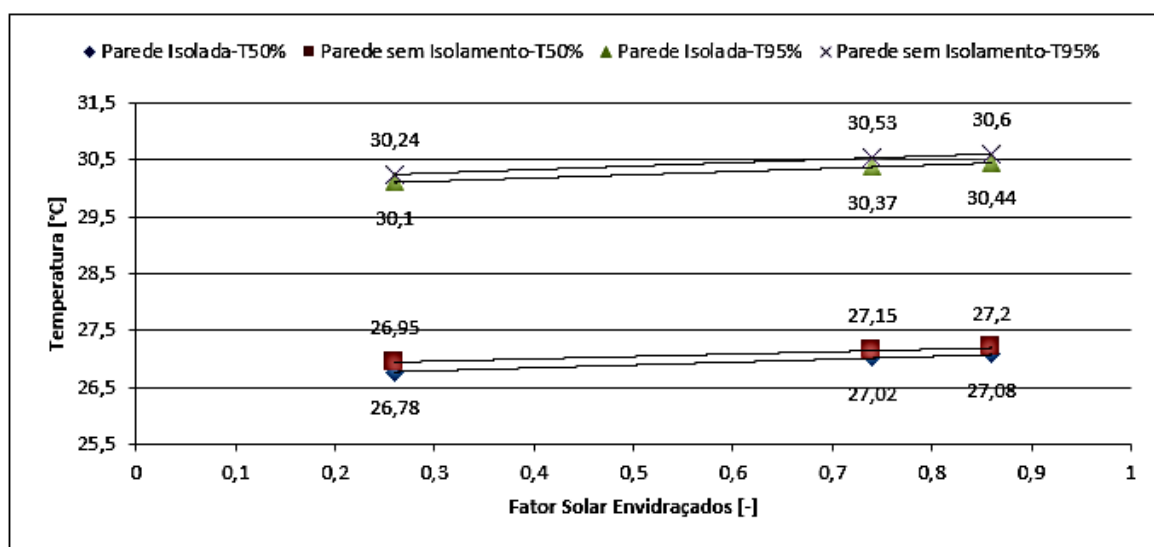


Fig. 96 - Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura interior, no verão, para Petrolina

Para o efeito, os casos apresentados (Fig. 96) mostram que para os dois cenários, a combinação das paredes com e sem isolamento, relacionadas ao fator solar dos envidraçados, apresentam para ambas as temperaturas nos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$ uma diferença de temperatura interior da casa de gesso da ordem de 10% (3°C). No entanto, ao analisar as temperaturas interiores resultantes da alteração dos vidros, de vidro simples (fator 0,86) para vidros refletivos (fator 0,26), chega-se à conclusão que esta substituição torna-se desnecessária, uma vez que o benefício obtido é em torno de $0,5^{\circ}\text{C}$, não se constituindo um grande benefício.

7.3.2. SÃO PAULO

7.3.2.1. Desempenho térmico no verão para São Paulo

De forma análoga, analisa-se a temperatura do ar interior da casa de gesso para São Paulo visando quantificar as necessidades e os efeitos do isolamento, ou não, de paredes e coberturas, da ventilação e do fator solar dos envidraçados e suas implicações no ambiente interior. Desta forma, são apresentados no presente capítulo, dentro dos cenários críticos representativos dos 54 cenários, os resultados da influência da alteração das variáveis: transmitância térmica de paredes e coberturas, ventilação noturna e do fator solar de envidraçados, na temperatura do ar interior.

Os resultados são apresentados para os mesmos cenários, com e sem isolamento, nas paredes e coberturas, de forma que ao variar o parâmetro em estudo, os demais permaneçam sem alteração, como determinado na Tabela 32 no capítulo 7.1.

A temperatura do ar interior, corresponde a média da temperatura do ar interior das 6 zonas térmicas de simulação é apresentada no gráfico da Fig. 97.

Na Fig. 97 apresentam-se os resultados da variação da temperatura do ar interior para a cidade de São Paulo, durante o verão, com duração de 8 meses (5832 horas).

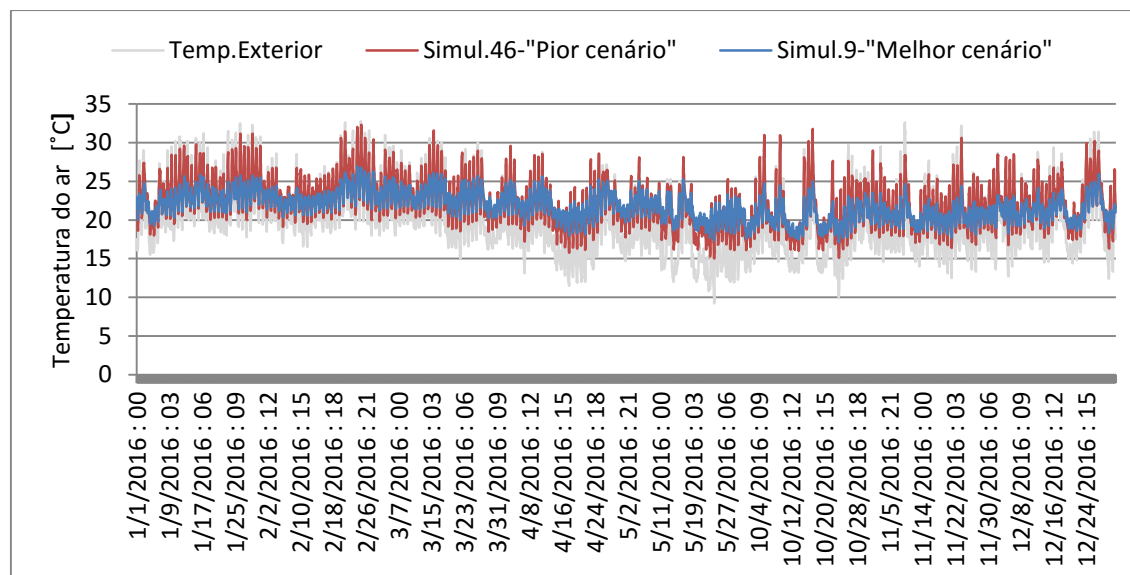


Fig. 97 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade São Paulo.

A análise dos resultados obtidos por simulação permite concluir de forma global o seguinte:

- A temperatura média interior da edificação em estudo, quando implantada em São Paulo, mantém-se em torno dos 22°C, o que pode se considerar uma temperatura de um nível de conforto favorável;
- O isolamento da cobertura para esse tipo de edificação pode garantir benefícios na redução da temperatura média do ar interior, em termos médios, da ordem de até 5°C, quando se analisa as temperaturas máximas registradas. Para um percentil de temperatura de 95%, essa diferença chega aos 2,5°C;
- Os cenários estudados para o clima São Paulo situam a temperatura média muito próxima nos dois cenários estudados.

Na Tabela 39 são apresentados os resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão para São Paulo.

Tabela 39 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários estudados para a cidade de São Paulo.

Cenário	Simul. 9 – “Melhor cenário”: cob.isolada + parede isolada + 3.0Rph	Simul. 46 – “Pior cenário”: Cob. e parede sem isolamento + 1.5 Rph
Temp.> 25°C	177h (3,03%)	898h (15,39%)
Máxima	26,94	32,33
Média	21,76	22,06
Mínima	17,13	15,0
Quartil 25	20,44	19,97
Quartil 50	21,76	21,85
Quartil 75	22,98	23,87
Percentil 95%	24,69	27,23
Percentil 98%	25,25	28,59
Percentil 99%	25,64	29,42

Nos resultados apresentados na Tabela 39, as diferenças são substanciais no quantitativo de horas com temperaturas acima dos 25°C para os dois casos analisados, entre os cenários registra-se um percentual maior que 12% de diferença. O cenário com cobertura e paredes isoladas “Melhor cenário” apresenta uma temperatura máxima com registro de mais de 5°C menor que a mesma temperatura apresentada para uma situação de cenário sem isolamento das paredes e cobertura. Para as temperaturas do percentil T_{95%}, essa diferença é de apenas 2,5°C.

A Fig. 98 ilustra a comparação das probabilidades acumuladas da temperatura do ar interior dos cenários estudados e apresentados na Tabela 39.

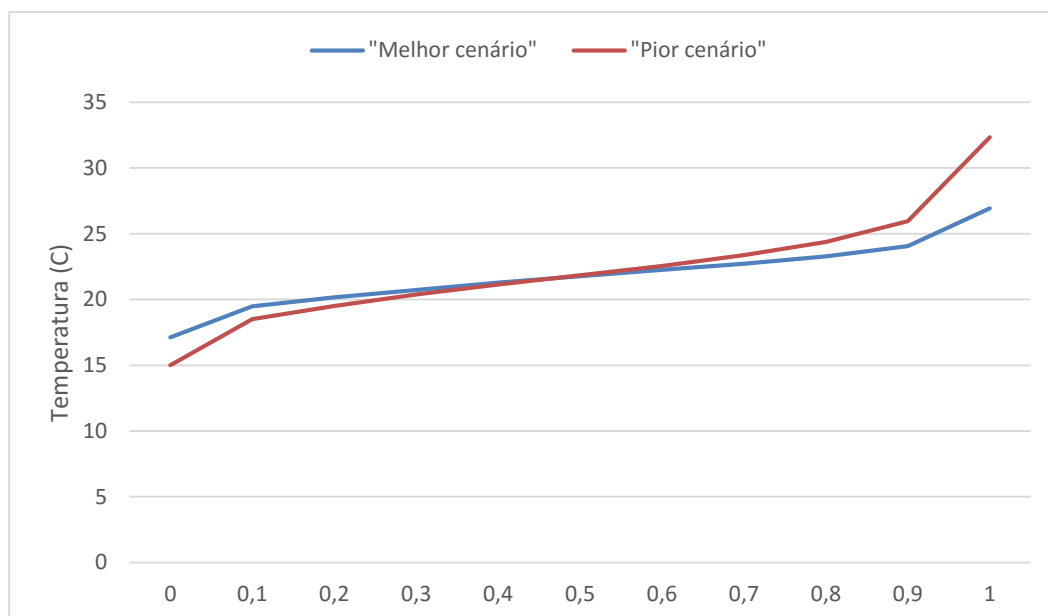


Fig. 98 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para os cenários críticos estudados em São Paulo.

As curvas de probabilidade acumulada que se apresentam na Fig. 98 mostram uma proximidade entre as temperaturas do ar interior dos cenários simulados com isolamento e sem isolamento, refletindo um nível de conforto que difere em torno de 5°C, para as temperaturas máximas.

Na Tabela 40 apresentam-se as temperaturas máximas para São Paulo.

Tabela 40 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários críticos estudados para São Paulo.

Cen. 9 -cob.Isolada + 3.0 Rph-“Melhor cenário”	Cen. 46 -cob.sem Isol. + 1.5 Rph-“Pior cenário”	Diferença entre os cenários
26,94 °C	32,33 °C	5,3 °C

Os resultados apresentados na Tabela 40 é possível destacar que:

- A diferença de 5,3°C entre as temperaturas máximas dos cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” registrado mostram a influência do isolamento nos picos de altas temperaturas. A colocação do isolamento nas paredes e cobertura é capaz de minorar a temperatura interior em 20% de acordo com os registros;
- A influência do nível de ventilação noturna de 3Rph aliada ao isolamento da envoltória, mostra entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” contribuir de forma favorável a um melhor desempenho térmico interior da casa de gesso.

Dos resultados obtidos, constata-se que para a cidade de São Paulo, durante a estação de verão, a temperatura do ar interior nos cenários simulados com isolamento térmico da cobertura e paredes é inferior às das simulações sem isolamento térmico, a diferença observada se traduz como significativa superando 2°C, o que traduz que a utilização de isolamento térmico na cobertura é capaz de proporcionar uma redução de 10% na temperatura do ar interior, quando se observa a temperatura para o percentil 95%.

Nos subcapítulos 7.3.2.2 a 7.3.2.4 expõe-se um estudo individual da influência de cada parâmetro simulado e suas implicações no desempenho térmico da casa de gesso para a cidade de São Paulo.

7.3.2.2. Influência do isolamento térmico da cobertura e paredes na temperatura de verão para São Paulo

Análogo ao estudo apresentado para Petrolina no capítulo 7.3.1, apresenta-se um estudo comparativo da combinação da influência da transmitância térmica da cobertura e paredes no desempenho térmico da casa de gesso-tipo em três níveis de transmitância térmica para a cobertura ($U_{\text{cobertura}} = 0,51 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; $U_{\text{cobertura}} = 1,03 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e $U_{\text{cobertura}} = 2,08 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), e dois níveis de transmitância para as paredes ($U_{\text{parede}} = 1,05 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $U_{\text{parede}} = 1,90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$).

Cada um dos pontos representa as temperaturas dos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$ do ar interior da habitação e o seu respectivo valor correspondente de transmitância térmica.

Com relação à influência do U da cobertura no nível de desempenho da casa de gesso-tipo na estação de verão, Fig. 99, nota-se que a temperatura média interior diminui quando há uma diminuição do isolamento das paredes e cobertura, o que implica variação no nível de desempenho do protótipo. Esses resultados indicam uma redução de valores de temperatura de 1°C entre as paredes e cobertura sem isolamento no percentil $T_{50\%}$, entre os valores mínimo e máximo de U_{parede} , respectivamente. Sendo assim, pode-se afirmar que o aumento dessa propriedade física da cobertura influencia no desempenho desse tipo de habitação no verão, e pode apresentar ganhos térmicos de até $4,0^\circ\text{C}$ quando se compara a temperatura para os percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$, para coberturas com transmitância térmica para $U_{\text{cobertura}} = 1,03 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, no clima analisado em São Paulo.

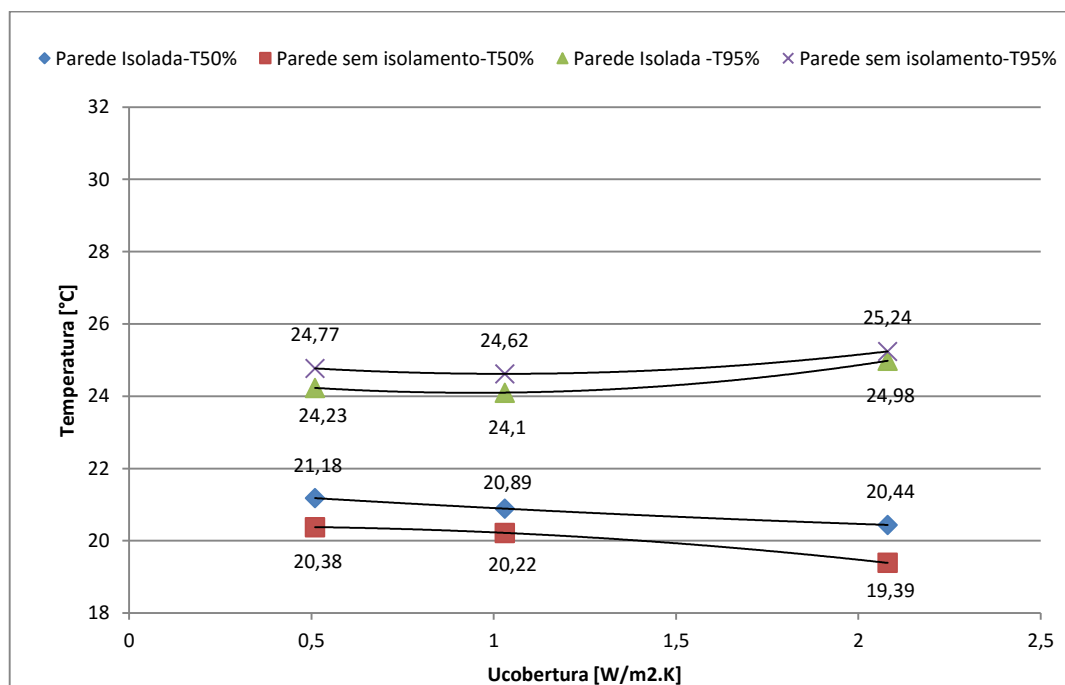


Fig. 99 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura do ar interior de verão para São Paulo.

7.3.2.3. Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para São Paulo

Avaliou-se a influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes no desempenho térmico da casa de gesso também em três níveis de ventilação noturna (1,5 Rph; 2 Rph e 3 Rph). Para o efeito, no estudo apresentado (Fig. 100) mostra que não há ganhos substanciais entre isolar ou não as paredes para este clima ao se comparar as temperaturas nos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$, quando analisadas individualmente. É possível ainda verificar que ao mudar o nível de ventilação de 1,5 Rph para 3,0 Rph, mesmo considerando as paredes com e sem isolamento, a temperatura interior da casa de gesso não apresenta alterações substanciais e se mantém numa faixa de conforto próximo dos 25°C.

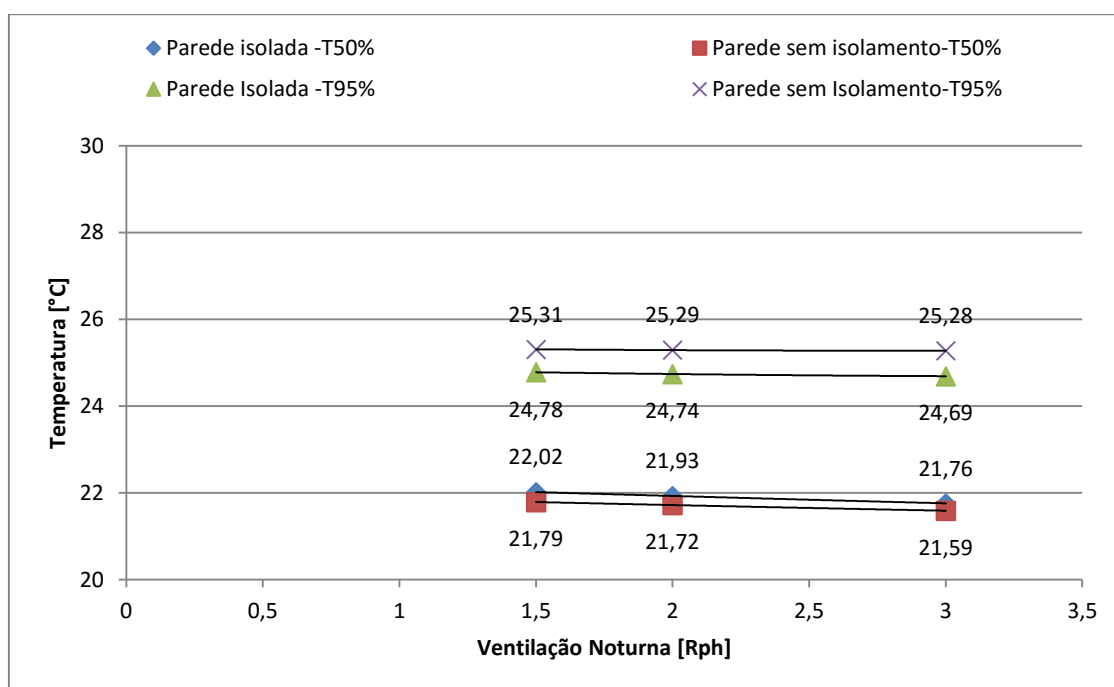


Fig. 100 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico de paredes no verão para São Paulo

7.3.2.4. Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para São Paulo

Ao avaliar a influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes no desempenho térmico da casa de gesso, adotaram-se as mesmas premissas das demais cidades analisadas. São também comparados três níveis de valores para este parâmetro, 0,86 que corresponde ao vidro simples, 0,74 correspondente ao vidro duplo e 0,26 correspondente ao vidro reflexivo. Para o efeito, os casos apresentados (Fig. 101) mostram que para dois cenários: parede isoladas e sem isolamento analisados nos percentis $T_{95\%}$, a diferença entre as temperaturas encontradas para aplicação dos três vidros analisados se mantém inferior a 1°C, o que implica na análise deste percentil, ser desnecessário a troca de vidros para este clima. A influência maior está no nível de isolamento das paredes.

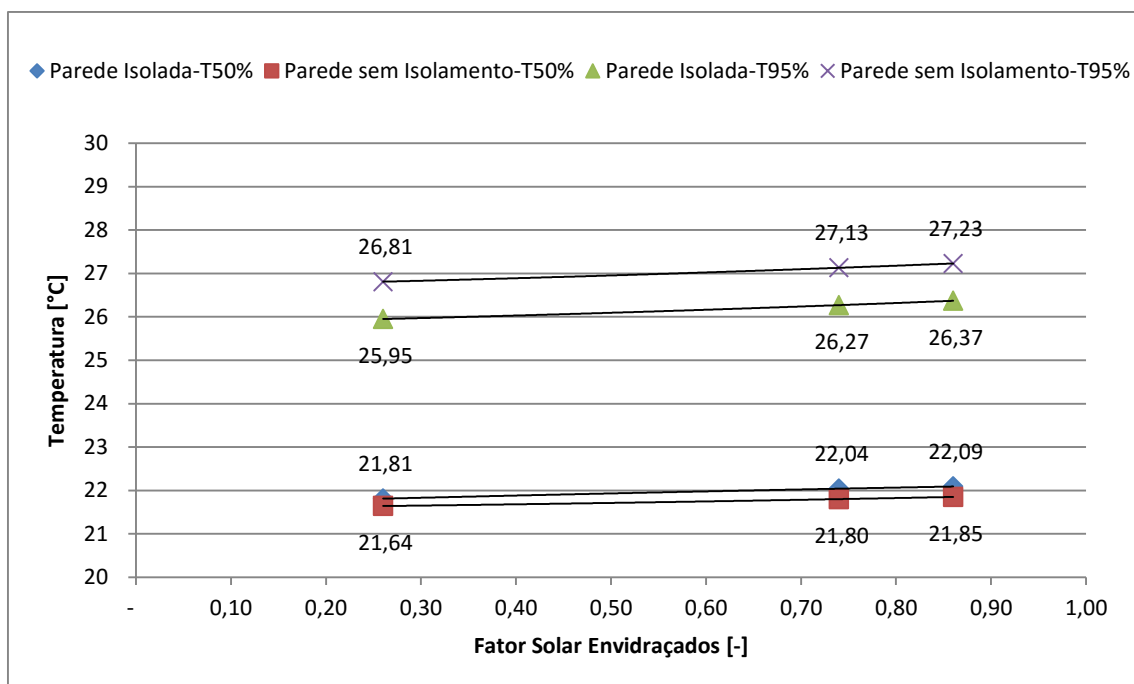


Fig. 101 - Influência do fator solar de envidraçados na temperatura do ar interior no verão para São Paulo.

7.3.3. CURITIBA

7.3.3.1. Desempenho térmico no verão para Curitiba

Analisou-se a temperatura do ar interior da casa de gesso para Curitiba visando quantificar as necessidades e os efeitos do isolamento, ou não, de paredes e coberturas, da ventilação e do fator solar dos envidraçados e suas implicações de maneira análoga ao que vem sendo feito para outras cidades, passa-se a expor de igual forma, seguindo os mesmos preceitos.

A Fig. 102 apresenta os resultados da variação da temperatura do ar interior para Curitiba durante o verão, com duração de 8 meses (5832 horas).

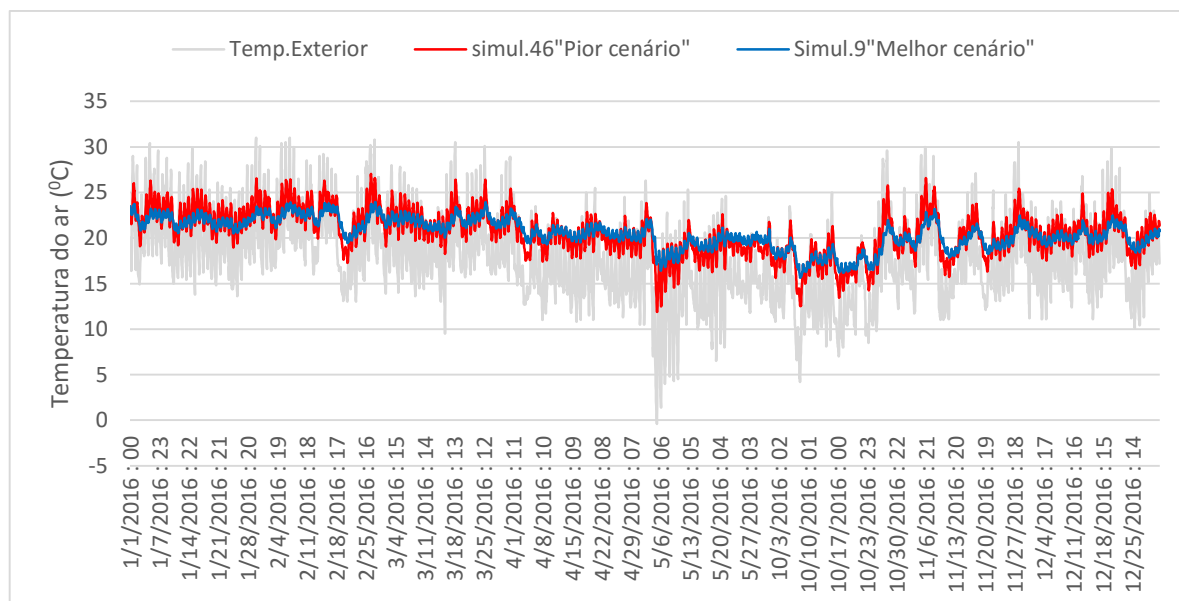


Fig. 102 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade de Curitiba.

A análise dos resultados obtidos por simulação permite concluir de forma global que:

- A temperatura média interior da casa de gesso quando implantada em Curitiba, mantém-se em torno dos 20°C, o que caracteriza um nível de conforto favorável;
- As temperaturas médias simuladas não mostram diferenças significativas entre isolar ou não, as paredes e coberturas para este clima;
- Os cenários estudados para o clima Curitiba situam a temperatura média muito próxima nos dois cenários.

Na Tabela 41 são apresentados os resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão para Curitiba.

Tabela 41 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários críticos estudados para a cidade de Curitiba.

Cenário	Sim.9-"melhor cenário"- cob.isolada+parede isolada + 3.0Rph	Sim.46-"Pior cenário"- cob.sem isolamento+ parede sem isol +1.5Rph
Temp.> 25°C	0h (0%)	166h (2,85%)
Máxima	23,95	27,05
Média	20,54	20,59
Mínima	15,65	11,89
Quartil 25	19,54	18,95
Quartil 50	20,59	20,66
Quartil 75	21,81	22,29
Percentil 95%	23,02	24,56
Percentil 98%	23,38	25,25
Percentil 99%	23,59	25,77

Nos resultados apresentados na Tabela 41, as diferenças não são consideradas elevadas no quantitativo de horas em que as temperaturas estão acima dos 25°C. O cenário com cobertura e paredes isoladas "Melhor cenário" apresenta valor nulo, enquanto que, o cenário "Pior cenário" apresenta apenas 2,85% das 5832 horas na estação do verão, o que equivale a um total de 166 horas.

A Fig. 103 ilustra a comparação das probabilidades acumuladas da temperatura do ar interior dos cenários estudados e apresentados na Tabela 41.

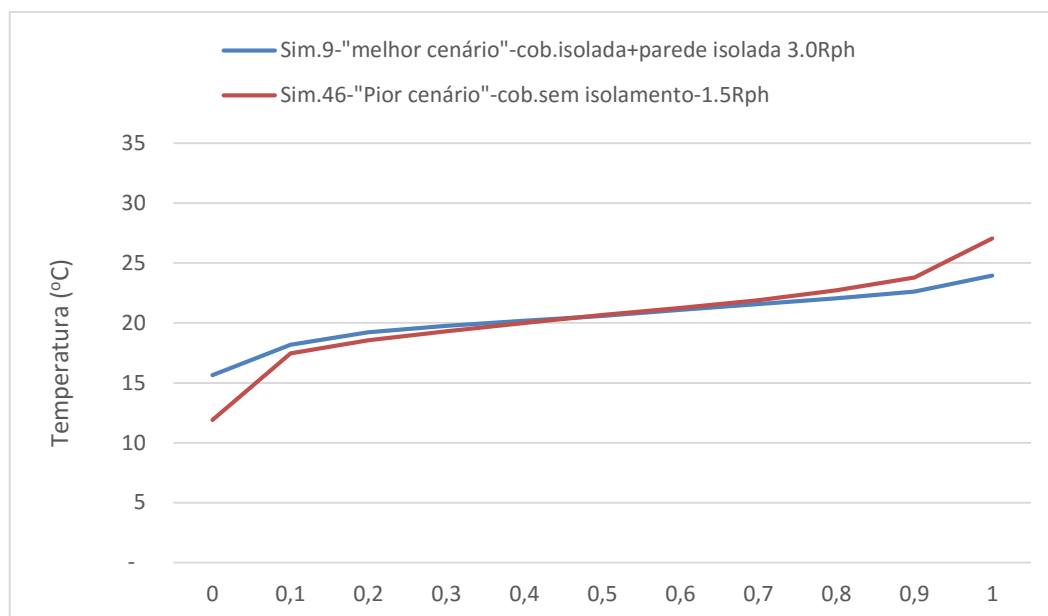


Fig. 103 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para os cenários críticos estudados em Curitiba.

As curvas de probabilidade acumulada que se apresentam na Fig. 103 mostram uma proximidade entre as temperaturas do ar interior dos cenários simulados com isolamento e sem isolamento, refletindo um nível de conforto que difere apenas para as temperaturas máximas e mínimas.

Na Tabela 42 apresentam-se as temperaturas máximas para Curitiba.

Tabela 42 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários estudados em Curitiba

Cen. 9 -cob.Isol.+parede isol.+3.0 Rph-“Melhor cenário”	Cen. 46-cob.sem Isol.+parede sem isol.+ 1.5 Rph- “Pior cenário”	Diferença entre os cenários
23,9 °C	27,0 °C	3,1 °C

Os resultados apresentados na Tabela 42 é possível destacar que:

- A diferença de 3,1°C entre as temperaturas máximas dos cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” registrado, mostram a influência do isolamento nas temperaturas máximas obtidas. A colocação do isolamento nas paredes e cobertura é capaz de minorar a temperatura interior em 13% de acordo com os registros;
- A influência do nível de ventilação de 3Rph aliada ao isolamento da envoltória melhora desempenho térmico interior da casa de gesso.

Dos resultados apresentados, é possível concluir que para a cidade de Curitiba, durante a estação de verão, a temperatura do ar interior nos cenários simulados com isolamento térmico da cobertura e paredes é inferior às das simulações sem isolamento térmico, a diferença é observada se traduz significativa em 2°C, quando se analisa o percentil 99%.

Nos subcapítulos 7.3.3.2 a 7.3.3.4 expõe-se um estudo individual da influência de cada parâmetro simulado e suas implicações no desempenho térmico da casa de gesso para a cidade de Curitiba.

7.3.3.2. Influência do isolamento térmico da cobertura e parede na temperatura interior de verão para Curitiba

Análogo ao estudo que vem sendo desenvolvido, apresentou-se a combinação da influência da transmitância térmica da cobertura e paredes no desempenho térmico da casa de gesso em três níveis de transmitância térmica para a cobertura ($U_{cobertura} = 0,51 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; $U_{cobertura} = 1,03 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $U_{cobertura} = 2,08 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), e dois níveis de transmitância para as paredes ($U_{parede} = 1,05 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $U_{parede} = 1,90 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Da forma que vem sendo exposto o estudo, cada um dos pontos representa a temperatura simulada do ar interior da casa de gesso nos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$ e o seu respectivo valor correspondente de transmitância térmica da cobertura.

Com relação a influência do U da cobertura no nível de desempenho da casa de gesso na estação de verão, Fig. 104, verificou-se que a temperatura média interior simulada se eleva em função da redução do isolamento da cobertura para uma análise no percentil 95%, no entanto, esta elevação não é significativa. Este resultado indica uma redução de $0,5^\circ\text{C}$ na temperatura interior quando as paredes estão sem isolamento no mesmo percentil. Para uma análise feita entre as paredes isoladas e não isoladas, para um percentil 95%, é possível constatar um aumento de $0,6^\circ\text{C}$ quando se reduz o isolamento da cobertura ($U_{cobertura} = 2,08 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Sendo assim, pode-se afirmar que a redução do isolamento da cobertura neste clima, aumenta a temperatura interior da casa de gesso, no entanto, esse aumento não é elevado.

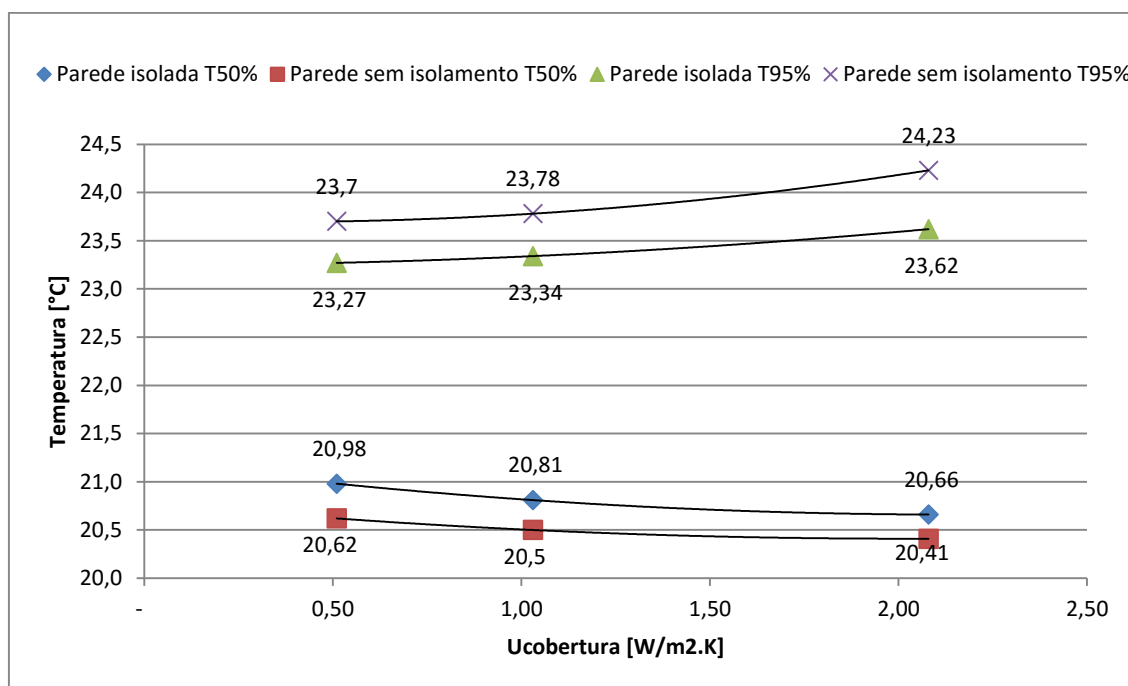


Fig. 104 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura interior de verão para Curitiba.

7.3.3.3. Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Curitiba

Avaliou-se a influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes no desempenho térmico da casa de gesso de forma análoga ao que se fez em outras cidades, fazendo variar três níveis de ventilação noturna (1,5 Rph; 2 Rph e 3 Rph) e duas tipologias de paredes, com isolamento e sem isolamento. Para o efeito, no estudo apresentado (Fig. 105) mostra que não há melhoras substanciais entre isolar ou não as paredes para esta cidade ao se comparar as temperaturas nos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$, quando analisados individualmente. É possível verificar que ao se comparar os valores das temperaturas simuladas para a casa de gesso no percentil $T_{95\%}$ para as paredes com e sem isolamento, a diferença de temperatura interior está próxima de $0,5^{\circ}\text{C}$ entre os três níveis de ventilação analisados. Numa análise para o percentil $T_{50\%}$, as diferenças encontradas mostram-se inferiores às encontradas para o percentil $T_{95\%}$.

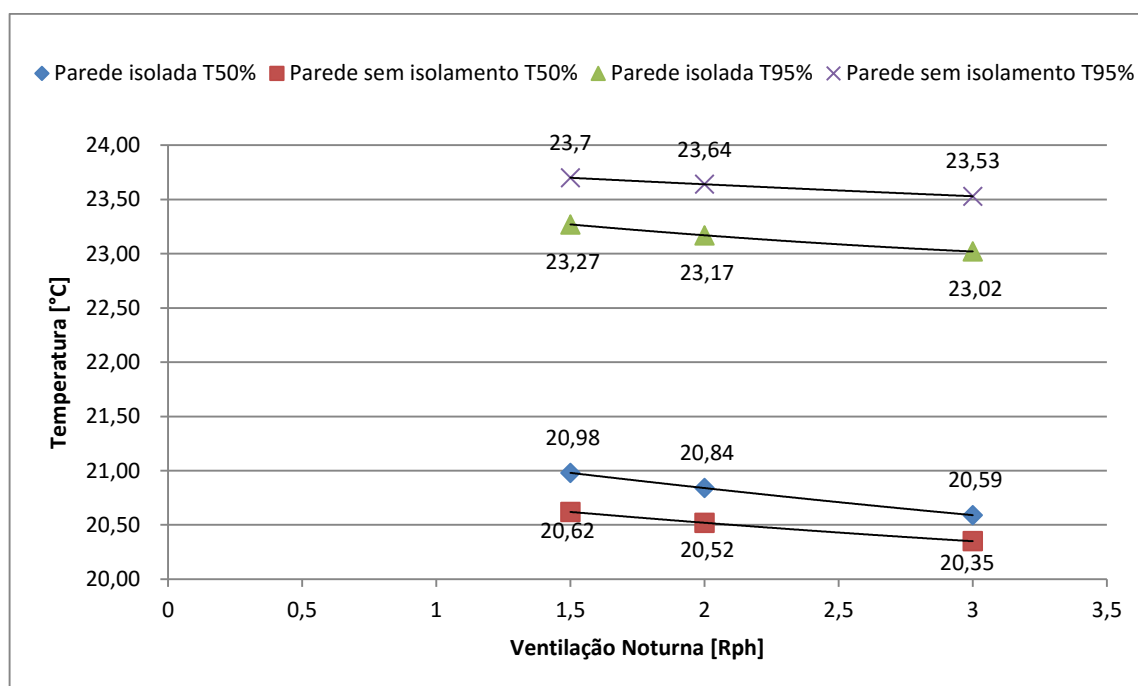


Fig. 105 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Curitiba.

7.3.3.4. Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Curitiba

Avaliou-se a influência do fator solar de envidraçados no desempenho térmico da casa de gesso-tipo, adotando-se as mesmas premissas das demais cidades analisadas. Foram comparados três níveis de valores para este parâmetro, 0,86 que corresponde ao vidro simples, 0,74 correspondente ao vidro duplo e 0,26 correspondente ao vidro refletivo. Para o efeito, os casos apresentados (Fig. 106) mostram que não há alterações de conforto interior na casa de gesso, quando se aplica envidraçados com diferentes fatores solares. Os resultados não se mostram significativos, mesmo que para dois cenários analisados nos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$, com paredes isoladas e sem isolamento, a diferença entre as temperaturas encontradas para a aplicação dos vidros simples (0,86) e refletivos (0,26), se mantém inalteradas, o que implica ser desnecessário a troca de vidros na cidade de Curitiba.

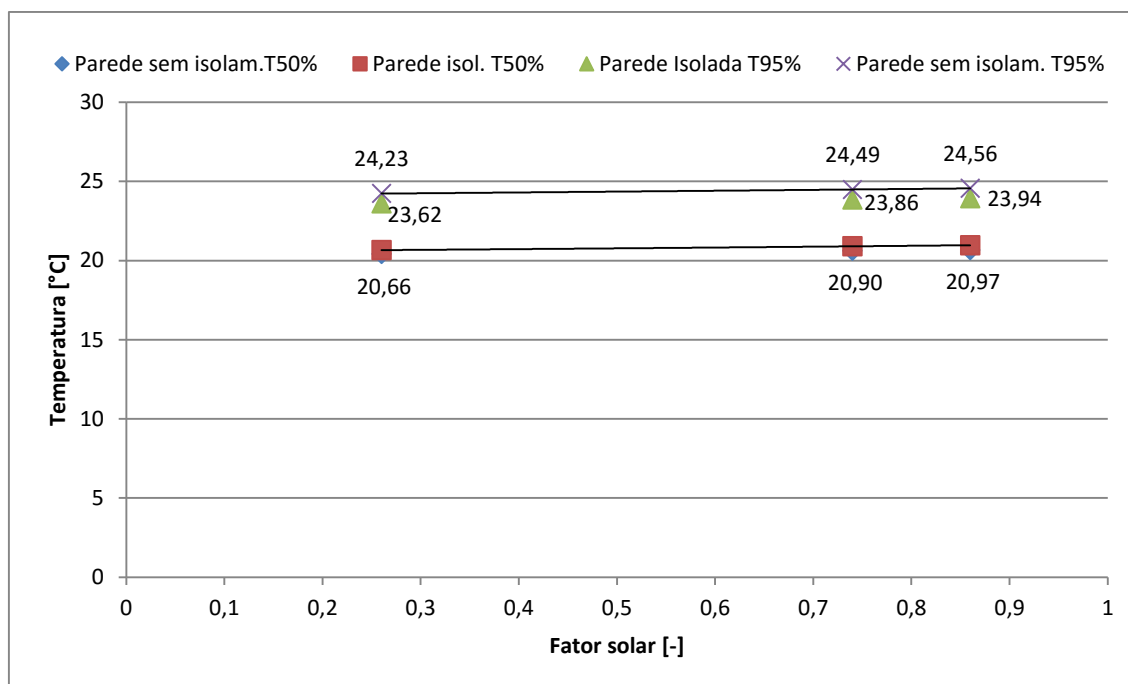


Fig. 106 - Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura do ar no verão para Curitiba.

7.3.4. RECIFE

7.3.4.1. Desempenho térmico no verão para Recife

Da forma que vem sendo analisado nas outras cidades, passa-se a expor de igual forma, seguindo os mesmos preceitos de análise para a cidade de Recife.

Na Fig. 107 é apresentado a variação da temperatura do ar interior para os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário”, na estação do verão.

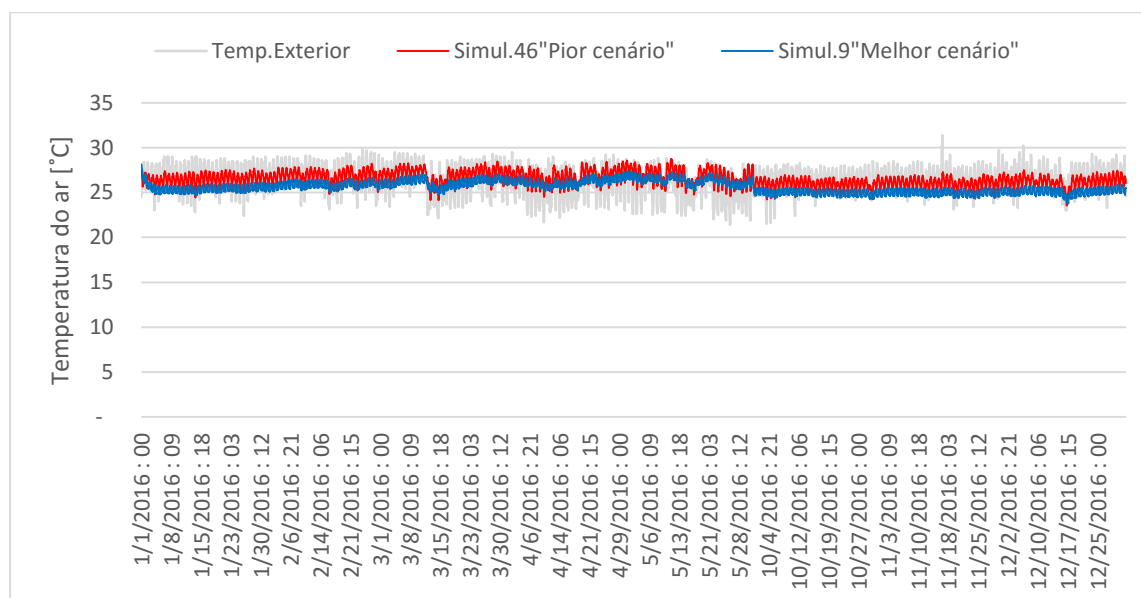


Fig. 107 - Temperatura do ar interior dos cenários críticos simulados, no verão, para a cidade de Recife.

A análise dos resultados obtidos por simulação permite concluir de forma global o seguinte:

- A temperatura média interior da casa de gesso quando implantada em Recife, mantém-se em torno dos 26°C, o que caracteriza 1°C acima da temperatura de conforto adotada neste documento;
- O fato de isolar as paredes da casa de gesso para este clima, reduz a temperatura média interior em aproximadamente 1°C;
- Os cenários estudados para o clima em Recife mostram que as temperaturas máximas simulada para os dois cenários são iguais, registrando-se resultados similares para as temperaturas mínimas.

Na Tabela 43 são apresentados os resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão para Recife.

Tabela 43 - Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de verão, dos cenários críticos estudados para a cidade de Recife.

Cenário	Simul.9-"Melhor cenário"- cob.isolada+parede isolada 3.0Rph	Simul46-cob.e parede sem isolamento 1.5 Rph
Temp.>25°C	4544h (77,9%)	5699h (97,2%)
Máxima	28,12	28,76
Média	25,62	26,48
Mínima	23,78	23,54
Quartil 25	25,11	25,93
Quartil 50	25,56	26,47
Quartil 75	26,13	27,06
Percentil 95%	26,83	27,84
Percentil 98%	27,00	28,05
Percentil 99%	27,12	28,19

Nos resultados apresentados na Tabela 43, é possível perceber para as temperaturas simuladas na casa de gesso em Recife, uma diferença de 20% no quantitativo de horas com temperaturas acima dos 25°C entre os cenários simulados. A análise comparativa para os dois cenários não apresenta valores de temperatura interior da casa de gesso com variabilidade significativa, verificando-se algo em torno de 1°C na temperatura média e nos três percentis analisados.

A Fig. 108 ilustra a comparação das curvas de probabilidade acumulada da temperatura do ar interior dos cenários estudados e apresentados na Tabela 43.

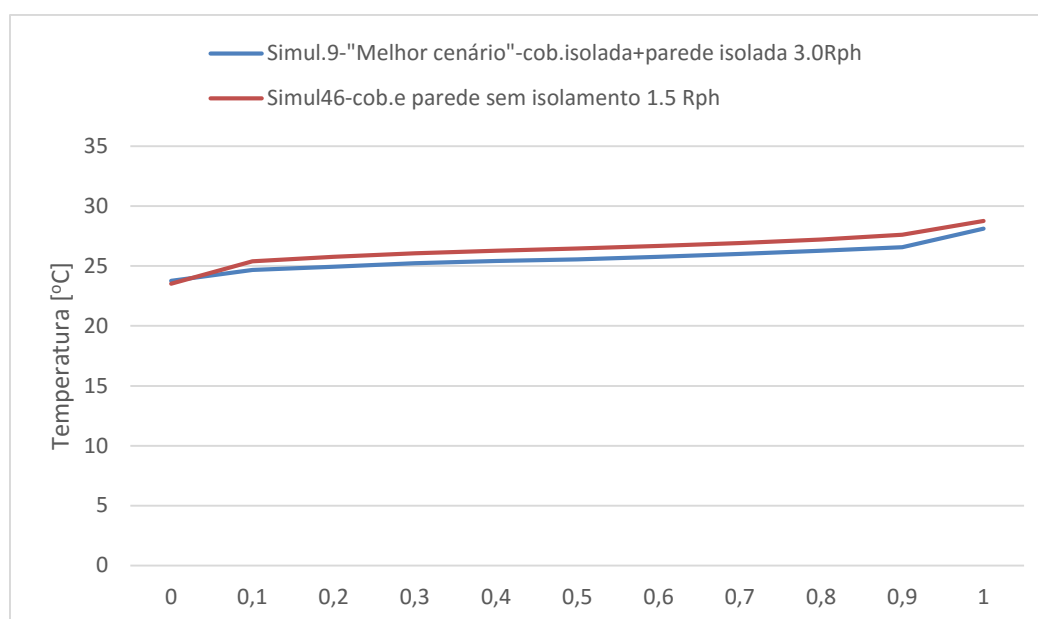


Fig. 108 - Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no verão para os cenários críticos estudados em Recife

As curvas de probabilidade acumulada apresentadas na Fig. 108 mostram uma proximidade entre as temperaturas do ar interior dos cenários simulados com isolamento e sem isolamento, refletindo um nível de conforto com temperaturas mínimas na faixa dos 23,5°C e máximas de 28,5°C. Para esta análise dos dois cenários, não se registra diferenças significativas entre isolar ou não a cobertura e paredes neste clima.

Na Tabela 44 são apresentadas as temperaturas máximas para Recife.

Tabela 44 - Temperatura do ar interior máxima no verão, dos cenários estudados em Recife

Cen. 9 - cob. Isolada+paredes isol.+ 3.0 Rph-“Melhor cenário”	Cen. 46-cob.sem Isol.+paredes s/isol.+ 1.5 Rph- “Pior cenário”	Diferença entre os cenários
28,1 °C	28,7 °C	0,6 °C

Os resultados apresentados na Tabela 44 é possível destacar que:

- A diferença de 0,6°C entre as temperaturas máximas dos cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” registrados, mostra a “pouca” influência entre isolar ou não isolar paredes e cobertura neste clima;
- A diferença de temperaturas internas simuladas de 1°C só é verificada a partir do quartil 50% para os cenários avaliados.

Dos resultados é possível constatar que, para a cidade de Recife, durante a estação de verão, a temperatura média do ar interior na casa de gesso, nos cenários simulados com isolamento térmico da cobertura e paredes, apresenta 1°C de diferença quando comparado com as simulações sem isolamento térmico.

Nos subcapítulos 7.3.4.2 a 7.3.4.4 expõe-se um estudo individual da influência de cada parâmetro simulado e suas implicações no desempenho térmico da casa de gesso para a cidade de Recife.

7.3.4.2. Influência do isolamento da cobertura e paredes na temperatura interior para Recife

Apresentou-se a combinação da influência da transmitância térmica no desempenho térmico da casa de gesso-tipo em três níveis de transmitância térmica para as paredes ($U_{\text{cobertura}} = 0,51 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$; $U_{\text{cobertura}} = 1,03 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{\text{cobertura}} = 2,08 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), e dois níveis de transmitância para as paredes ($U_{\text{parede}} = 1,05 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{\text{parede}} = 1,90 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$).

Da forma que vem sendo exposto, cada um dos pontos representa as temperaturas dos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$ do ar interior da habitação em estudo e o seu respectivo valor correspondente de transmitância térmica.

Com relação a influência do U da cobertura no nível de desempenho térmico da casa de gesso na estação de verão, Fig. 109, é possível perceber que a temperatura média interior simulada praticamente não varia consoante é reduzido o isolamento da cobertura.

As diferenças na temperatura interior simuladas são insignificantes ao ponto de não vir a influenciar entre isolar ou não isolar as coberturas neste clima.

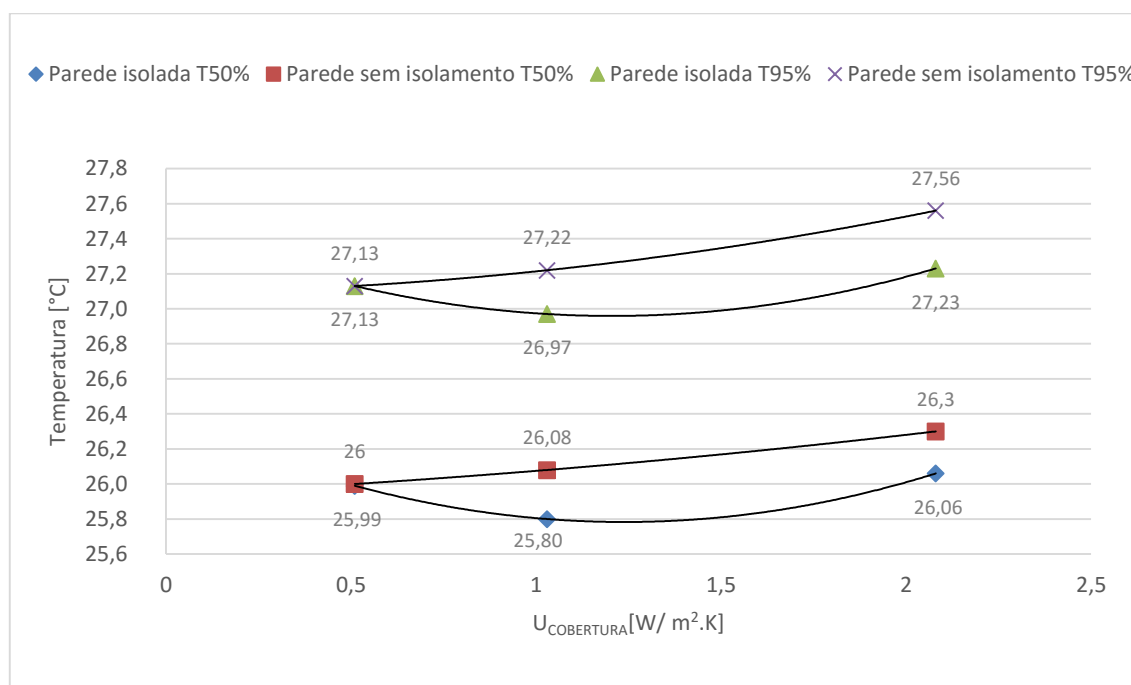


Fig. 109 - Influência da transmitância térmica da cobertura e paredes na temperatura interior de verão para Recife

7.3.4.3. Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura interior de verão para o Recife

Analogamente ao que vem sendo estudado, avaliou-se a influência da ventilação noturna no desempenho térmico da casa de gesso, neste clima, também em três níveis de ventilação noturna (1,5 Rph; 2 Rph e 3 Rph). Para o efeito, no estudo apresentado na (Fig. 110) mostra que entre 1,5Rph e 3 Rph para as paredes isoladas no percentil $T_{95\%}$, o incremento da ventilação faz a temperatura interior arrefecer algo próximo de $0,5^\circ\text{C}$, mantendo-se estável para uma análise do percentil $T_{95\%}$, o mesmo ocorrendo para o percentil $T_{50\%}$. No entanto, é verificado temperaturas idênticas para os dois primeiros níveis de ventilação para os dois casos de paredes isoladas ou não isoladas.

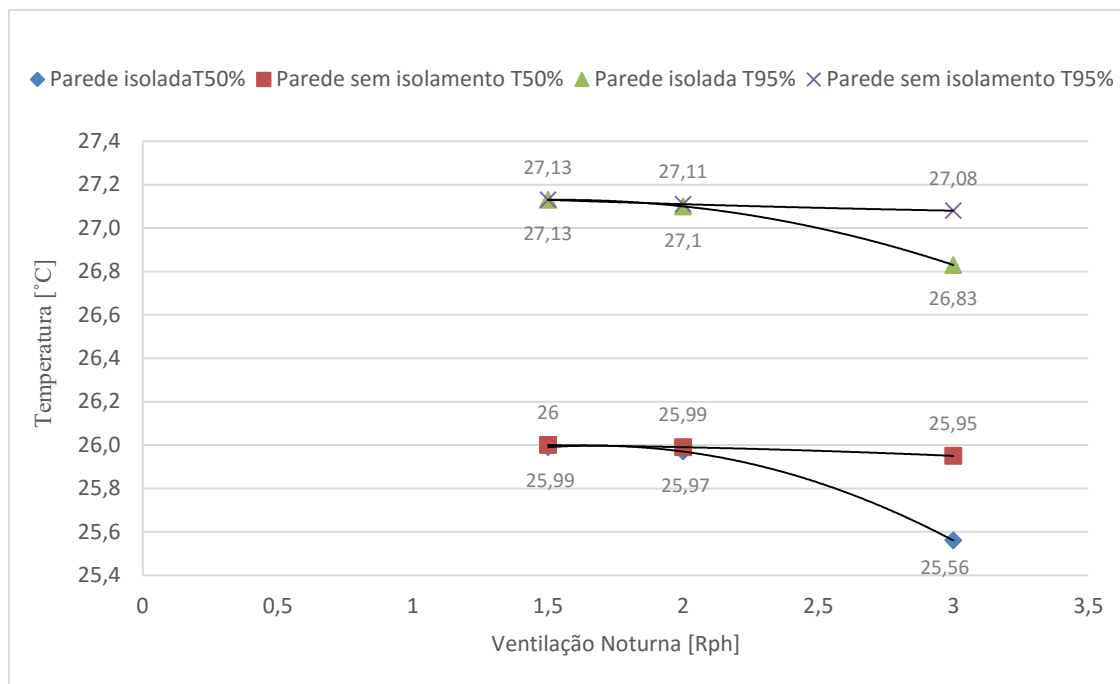


Fig. 110 - Influência da ventilação noturna e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Recife.

7.3.4.4. Influência do fator solar de envidraçados e do isolamento térmico das paredes na temperatura de verão para Recife

Foram comparados três níveis de valores para este parâmetro, 0,86 que corresponde ao vidro simples, 0,74 correspondente ao vidro duplo e 0,26 ao vidro refletivo. Avaliou-se a influência do fator solar de envidraçados no desempenho térmico da casa de gesso, seguindo-se as mesmas premissas das demais cidades analisadas.

É possível perceber por uma análise da Fig. 111, que não se verifica alterações relevantes no conforto interior na casa de gesso, quando se aplica envidraçados com os diferentes fatores solares. Os resultados não se mostram significativos, mesmo quando analisados dois cenários nos percentis $T_{50\%}$ e $T_{95\%}$, referentes a paredes isoladas e sem isolamento, a diferença entre as temperaturas simuladas para a aplicação dos vidros simples (0,86) e refletivos (0,26), se mantém praticamente inalteradas, o que implica ser desnecessário a troca de vidros na cidade de Recife.

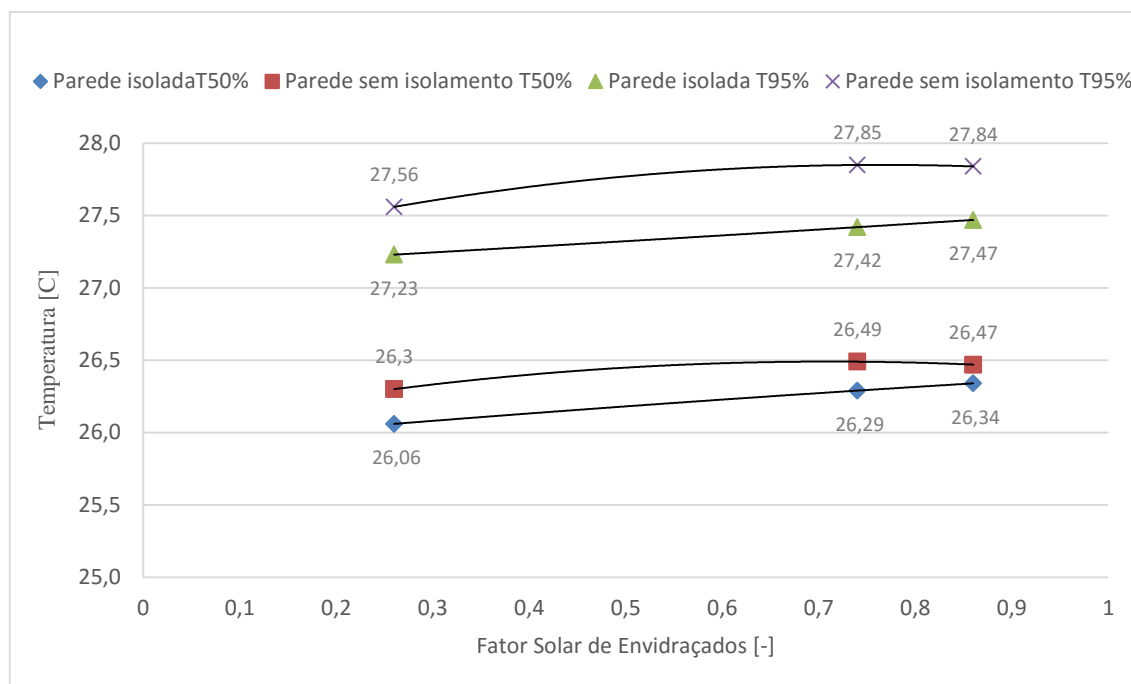


Fig. 111 - Influência do fator solar dos envidraçados e das paredes na temperatura interior de verão para Recife.

7.3.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE VERÃO

Neste subcapítulo, estabeleceu-se uma análise comparativa da influência da localização na temperatura do ar interior na estação de verão entre dois cenários de simulação (“Melhor cenário” e “Pior cenário”), para as 4 cidades do território nacional. Salienta-se que o caso denominado “Melhor Cenário” refere-se a uma situação em que a casa de gesso possui paredes e coberturas isoladas, vãos envidraçados com vidro refletivo, e o caso “Pior cenário”, refere-se paredes e coberturas sem isolamento térmico, com vidros simples nos vãos envidraçados. Para tal, compararam-se os valores de três indicadores de desconforto: percentagem de tempo de desconforto (percentagem de tempo em que a temperatura do ar interior está acima dos 25°C), temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95% ($T_{95\%}$).

Na Fig. 112, apresentam-se os valores da percentagem de tempo de desconforto térmico na estação de verão, para as quatro localizações do território nacional (Petrolina, São Paulo, Curitiba e Recife), para os cenários estudados.

O percentual de tempo de desconforto é calculado levando-se em consideração o quantitativo de horas em que a temperatura do ar interior está acima da temperatura de conforto, considerada de 25°C, contabilizada hora a hora, no período total de horas na estação de verão (5832h).

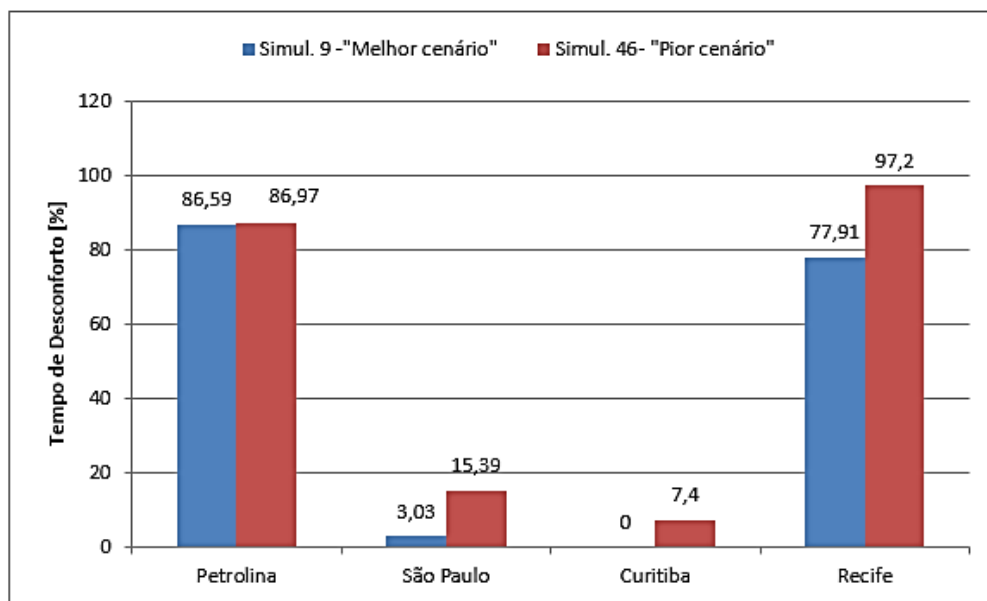


Fig. 112 - Percentagem de tempo de desconforto térmico no verão dos cenários críticos estudados para as 4 cidades

Da análise dos resultados da Fig. 112, é possível verificar que:

- A percentagem de tempo de desconforto térmico, no verão, apresenta percentuais distintos para todas as cidades estudadas;
- Nos cenários estudados considerados como “Pior cenário”, os maiores índices de desconforto são registrados para Petrolina e Recife com percentuais de 86,97% e 97,2%, cujos valores são muito elevados. Para uma análise do mesmo cenário para São Paulo e Curitiba, os registros apontam percentuais de desconforto de 15,39% e 7,4%, demonstrando uma boa adaptabilidade da casa de gesso no clima dessas cidades;
- Considera-se ser necessário adotar estratégias de condicionamento térmico passivo capazes de minorar o desconforto nas cidades de Petrolina e Recife, visto que, os percentuais apresentados para ambas as cidades ultrapassam 75%, o que torna-se impraticável em níveis econômicos e de saúde, a habitabilidade nestas condições para este tipo de construção.

Na Fig. 113 apresenta-se a temperatura média do ar interior do apartamento na estação de aquecimento para todas as localizações estudadas.

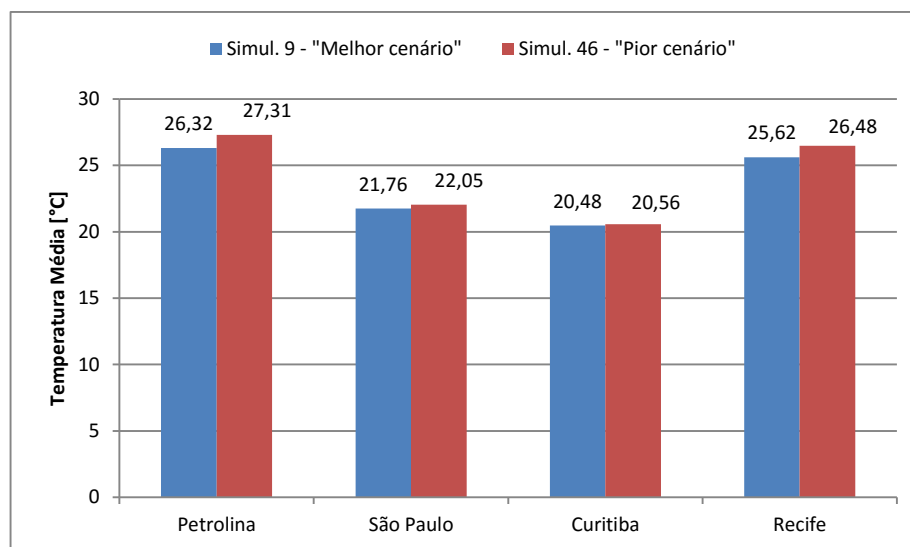


Fig. 113 - Temperatura média do ar interior no verão dos cenários críticos estudados para as 4 cidades

Da análise dos resultados da Fig. 113, é possível constatar que:

- O cenário de simulação 46 “Pior cenário” possui, dentre todas as localizações, a temperatura média do ar interior mais elevada, tendo em Petrolina, um valor máximo, 27,31°C, e, em Curitiba, valor mínimo de 20,56°C;
- O cenário de simulação 9 “Melhor cenário” possui, em todas as localizações, as temperatura médias do ar interior mais baixas, se comparadas ao “Pior cenário”, tendo, em Curitiba, o seu valor médio de 20,48°C, e, em São Paulo, 21,76°C;
- A diferença entre o cenário de simulação “Melhor cenário” para as cidades de Petrolina e Recife é menor que 1°C, demonstrando comportamento similar da casa de gesso nas duas cidades estudadas, prevalecendo um melhor comportamento em Recife.

Na Fig. 114 apresenta-se a temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95% ($T_{95\%}$) para a estação de verão, de cada localização estudada.

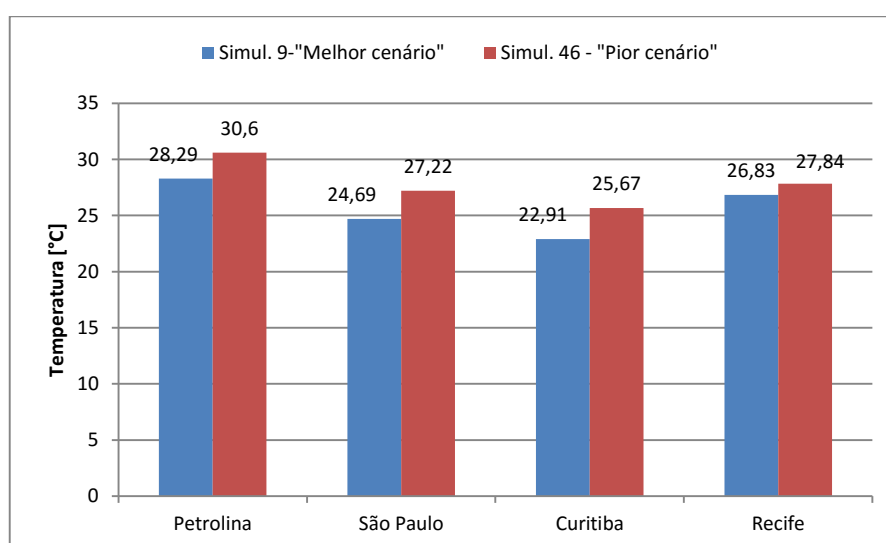


Fig. 114 - Temperatura do ar interior no verão correspondente ao percentil 95% ($T_{95\%}$)

Da análise dos resultados da Fig. 114, verifica-se que:

- O cenário estudado “Pior cenário” tem em Petrolina a situação mais agravante para os registros da temperatura do percentil 95% ($T_{95\%}$) com 30,6°C. Para além de Petrolina, outros casos de valores mais elevados, referem-se à cidade de Recife com 27,84°C e São Paulo com 27,22°C;
- O cenário estudado “Melhor cenário” apresenta os melhores valores de registros na temperatura do percentil 95% ($T_{95\%}$) para as cidades de Curitiba e São Paulo com valores de 22,91°C e 24,69°C, respectivamente;
- A diferença entre os cenários “Melhor” e “Pior”, é mais elevada, nas simulações para a cidade de Curitiba, cujos registros chegam a 2,76°C, e menos elevada na cidade de Recife, com 2,01°C.

Na Tabela 45, é apresentado em resumo os valores dos parâmetros avaliados: percentagem de tempo de desconforto térmico no verão, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%.

Tabela 45 - Representação dos parâmetros avaliados para as 4 cidades em estudo

Cidade	Parâmetro Avaliado	“Melhor Cenário”	“Pior Cenário”
Petrolina	Porcentagem Desconforto [%]	86,59	86,97
	Temperatura Média [°C]	26,32	27,31
	Temperatura Percentil 95% [°C]	28,29	30,6
São Paulo	Porcentagem Desconforto [%]	3,03	15,39
	Temperatura Média [°C]	21,76	22,05
	Temperatura Percentil 95% [°C]	24,69	27,22
Curitiba	Porcentagem Desconforto [%]	0	7,4
	Temperatura Média [°C]	20,48	20,56
	Temperatura Percentil 95% [°C]	22,91	25,67
Recife	Porcentagem Desconforto [%]	77,91	97,2
	Temperatura Média [°C]	25,62	26,48
	Temperatura Percentil 95% [°C]	26,83	27,84

Dos resultados, pode-se concluir em termos gerais que:

- O isolamento térmico de paredes e coberturas mostrou trazer benefícios aquando da aplicabilidade desse tipo de construção em São Paulo e Curitiba. A análise do tempo de desconforto para as duas cidades, na estação de verão, registra índices mínimos de 3,03% e nulo respectivamente para o “Melhor cenário”. As temperaturas do ar interior no percentil 95% ($T_{95\%}$) nas duas cidades estão próximas da temperatura de conforto de 25°C na estação de verão. No entanto, uma análise para as cidades de Petrolina e Recife, o percentual de tempo de desconforto, na mesma estação, demonstra a inaplicabilidade do tipo de construção em gesso por apresentar desconforto superior a 75% em ambos os cenários estudados. Entretanto, quando esta análise se refere ao parâmetro temperatura média, os valores se distanciam pouco da temperatura de 25°C, estabelecida como de conforto nesta Tese.

- A adoção de estratégias simples de condicionamento térmico passivo na casa de gesso-tipo nas cidades de Recife e Petrolina, tais como sombreamento das aberturas, melhores níveis de isolamento da cobertura, pode minorar as temperaturas médias no interior da casa, fazendo com que esta passe a uma condição de habitabilidade mais favorável.

7.4. CONSUMO ENERGÉTICO NA ESTAÇÃO DE VERÃO-ARREFECIMENTO

A quantificação do consumo energético configura outro fator em que se baseia na opção de isolar ou não a envoltória exterior, sombrear ou não as aberturas, enfim adotar ou não estratégias de condicionamento passivo que possa minimizar o consumo energético. Através do programa avançado WUFIPlus obtiveram-se os resultados de necessidade energética para os meses da estação do verão, necessários a obtenção do conforto térmico nesta estação referenciada.

Os resultados apresentados referem-se ao somatório da necessidade energética das zonas térmicas simulada da casa de gesso-tipo, culminando no total da fatura energética.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados da necessidade energética para Petrolina, São Paulo, Recife e Curitiba, com base nas simulações que representam o “Melhor cenário” e “Pior cenário”, como fora apresentado nos capítulos anteriores.

7.4.1. PETROLINA

Na Fig. 115 apresentam-se os resultados do consumo energético, para Petrolina, durante o período de verão, com duração de 8 meses (5832 horas).

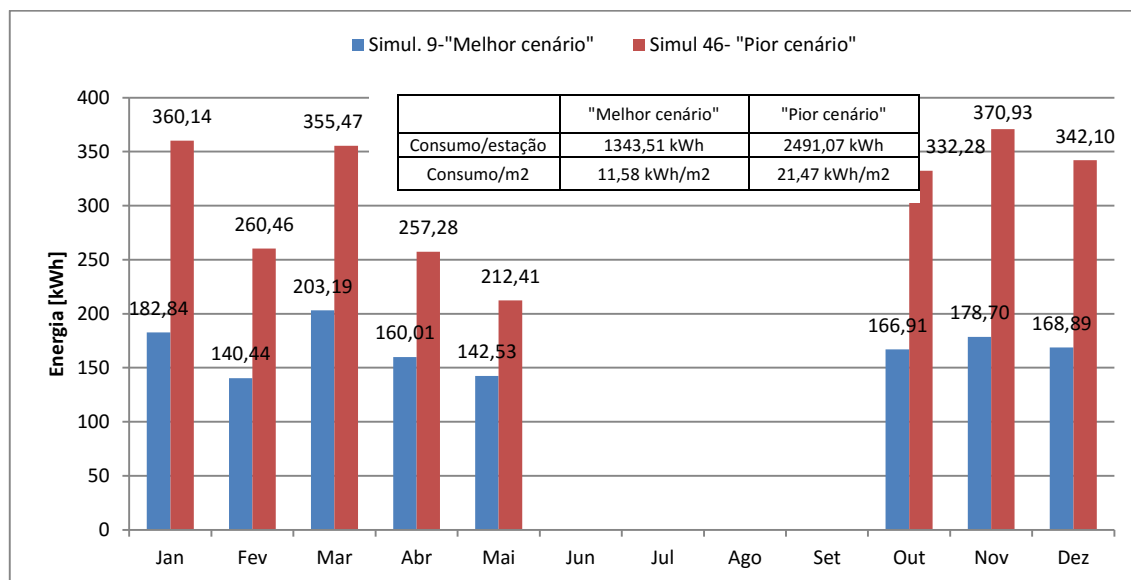


Fig. 115 - Consumo energético para arrefecimento na estação do verão para Petrolina

Da análise da Fig. 115 constata-se que:

- Novembro é o mês com maior consumo energético para o cenário “Pior cenário” (paredes e cobertura sem isolamento) e Maio apresenta-se como o mês de menor consumo para o mesmo cenário;
- A aplicação concomitante de isolamento térmico nas paredes e coberturas proporciona uma diferença de consumo considerável. Em termos de consumo total, é de 1147,56 kWh, e por m^2 é de 9,89 kWh/ m^2 , levando-se em consideração uma área habitável de 116 m^2 ;
- A colocação de isolamento permite uma poupança energética de aproximadamente 54%, entretanto, o hábito de arrefecer as residências no Brasil é uma prática corrente das famílias de classe média, contrariamente ao que acontece nas de baixa renda, motivado por razões econômicas e culturais, é importante demonstrar o seu custo nesta Tese.

Na Fig. 116, apresentam-se os custos mensais de energia para arrefecimento em Petrolina. Estes custos são relativos à utilização de aparelhos comerciais de ar condicionado, sendo esta uma forma usual de arrefecer as residências com mais frequência na região Nordeste do Brasil. Quantificou-se o custo para este tipo de demanda energética tendo como valor de referência R\$ 0,347/kWh.

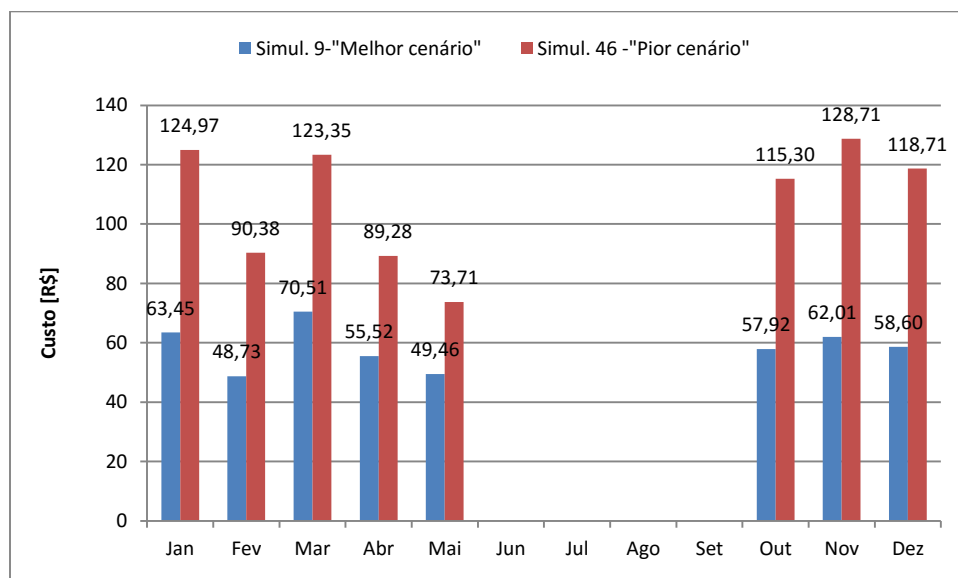


Fig. 116 - Custo de Energia de arrefecimento mensal, no verão, para Petrolina

Tabela 46 - Custos totais de energia de arrefecimento no verão para Petrolina

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no verão para Petrolina			
Valores	"Melhor Cenário"	"Pior cenário"	Diferença entre os cenários
Totalização na estação [kWh]	1.343,51	2.491,07	1.147,56
Custo/ m^2 na estação [R\$]	4,01	7,45	3,44

Dos resultados da Fig. 116 e da Tabela 46, é possível concluir que:

- Arrefecendo-se com recurso a energia elétrica, a diferença de consumo, entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário”, chega a atingir um valor superior a 1.000 kWh para os registros na estação em estudo;
- Retirando-se o isolamento de paredes e coberturas do “Melhor cenário”, implica elevar o custo energético em até 85% na estação de verão, verificado nos custos por m² de energia consumida.
- Ressalta-se pelos resultados apresentados, que há uma influência relevante do isolamento da cobertura e paredes (“Melhor cenário”) em relação ao (“Pior cenário”), paredes e cobertura sem isolamento. O custo de arrefecimento, comparando-se os dois cenários, é aproximadamente o dobro.

Nota: O consumo energético para Petrolina, na estação do verão, é aproximadamente 2,5 vezes maior que o consumo registrado na estação de inverno.

7.4.2. SÃO PAULO

Na Fig. 117 apresentam-se os resultados do consumo energético para São Paulo para a estação de verão, com duração de 8 meses (5832 horas).

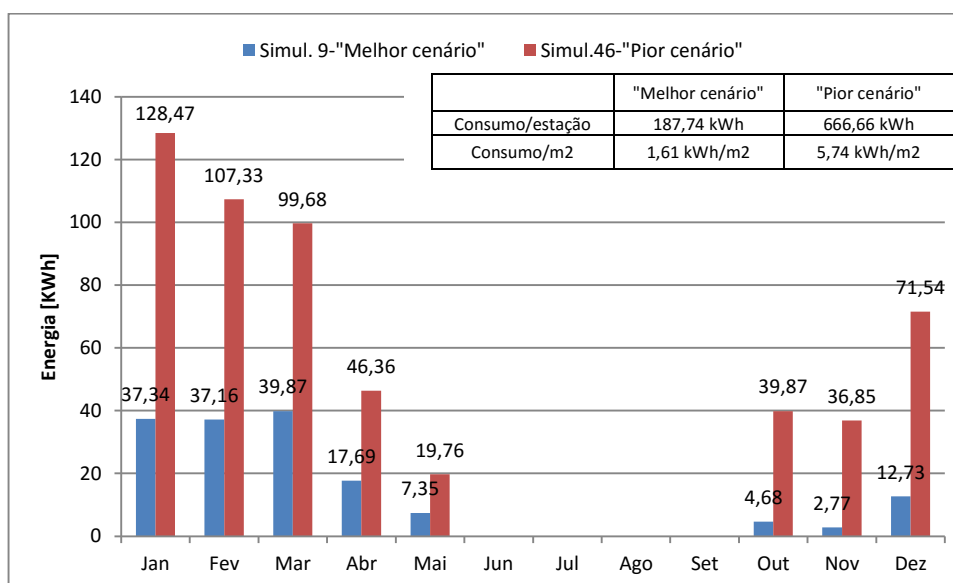


Fig. 117 - Consumo energético para arrefecimento na estação do verão para São Paulo.

Da análise da Fig. 117 constata-se que:

- Janeiro e Fevereiro são os meses com maior consumo energético para o cenário considerado “Pior cenário”;
- A aplicação de isolamento térmico nas paredes e cobertura é capaz de proporcionar uma diferença de consumo considerável. Em termos de consumo total é de 478,92 kWh, e por m² de área de pavimento, é de 4,13 kWh/m²;

- Isolar paredes e cobertura na cidade de São Paulo, permite uma redução no consumo energético superior aos 100%, quando essas paredes e cobertura estão sem isolar.

Na Fig. 118 apresentam-se os custos mensais de energia elétrica para arrefecimento em São Paulo. Vale salientar que os resultados apresentados para energia elétrica segue uma tendência de maior uso na matriz energética brasileira. Para a eletricidade considerou-se o preço de R\$ 0,34/kWh.

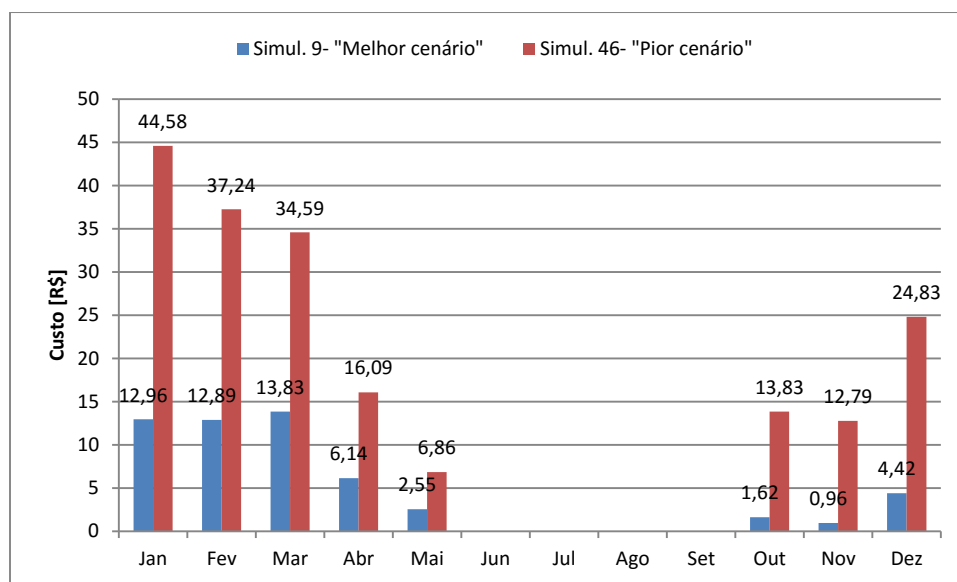


Fig. 118 - Custo de energia de arrefecimento no verão para São Paulo

Na Tabela 47 apresentam-se os custos totais de arrefecimento e a diferença entre cenários sem isolamento ("Pior cenário") e com isolamento ("Melhor cenário").

Tabela 47 - Custos totais de energia, no verão, para São Paulo.

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no verão para São Paulo			
Valores	"Melhor Cenário"	"Pior cenário"	Diferença entre os cenários
Totalização na estação [kWh]	187,74	666,66	478,92
Custo/m ² na estação [R\$]	0,56	1,99	1,43

Dos resultados da Fig. 118 e Tabela 47, podemos destacar:

- Arrefecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de consumo entre os cenários "Melhor cenário" e "Pior cenário" é de 478,92 KWh. A diferença de custo por m² de área de pavimento entre os cenários analisados é de R\$ 1,43/m²;
- É possível uma redução de R\$ 31,62 e R\$ 24,35 no custo com energia elétrica nos meses de Janeiro e Fevereiro, quando se isola as paredes e cobertura da casa de gesso-tipo neste clima e estação em estudo.

Nota: O consumo energético para arrefecimento em São Paulo, na estação do verão, é aproximadamente 6 vezes maior que o consumo registrado na estação de inverno, verificado para o "Pior cenário".

7.4.3. CURITIBA

Na Fig. 119 apresentam-se os resultados do consumo energético para Curitiba, na estação de verão, com duração de 8 meses (5832 horas).

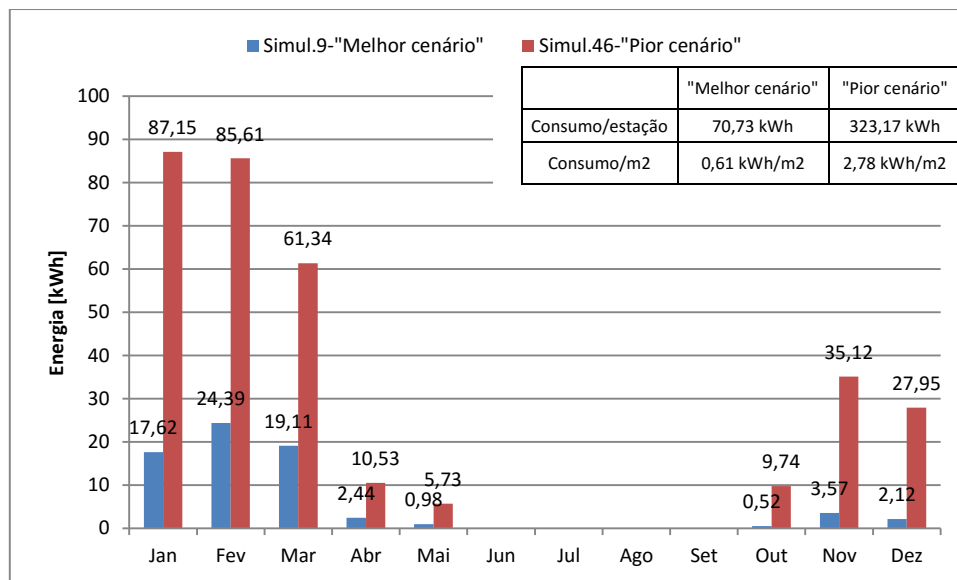


Fig. 119 - Consumo energético de arrefecimento na estação de verão para Curitiba.

Da análise da Fig. 119 constata-se que:

- Janeiro e Fevereiro são os meses com maior consumo energético para o cenário representativo do “Pior cenário” em análise;
- A aplicação de isolamento térmico nas paredes e coberturas neste clima pode proporcionar uma diferença de consumo elevada. Essa economia pode chegar aos 252 kWh quando comparados os dois cenários em estudos;
- A poupança energética atingida com a colocação de isolamento térmico nas paredes e cobertura permite economizar valores superiores a 100% em termos percentuais, em todos os meses da estação analisada.

Na Fig. 120 apresentam-se os custos mensais de energia para arrefecimento em Curitiba. Ressalta-se que a forma aqui explícita refere-se ao cálculo de energia elétrica, por ser esta a fonte mais utilizada no Brasil para arrefecer as habitações.

Para a eletricidade considerou-se o preço de R\$ 0,347/kWh, cujo preço é o praticado pela companhia distribuidora de energia do Paraná.

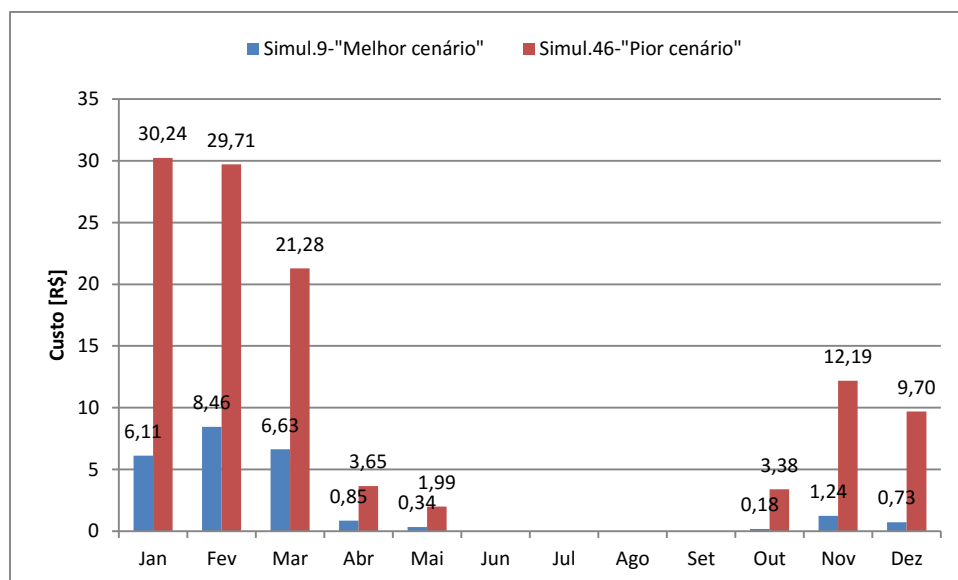


Fig. 120 - Custos de energia de arrefecimento no verão para Curitiba.

Na Tabela 48 apresentam-se os custos totais de arrefecimento e a diferença entre os cenários “Pior cenário” (sem isolamento) e “Melhor cenário” (com isolamento).

Tabela 48 - Custos totais de energia de arrefecimento, no verão, para Curitiba.

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no verão para Curitiba			
Valores	“Melhor Cenário”	“Pior cenário”	Diferença entre os cenários
Totalização na estação [kWh]	70,73	323,17	252,44
Custo/m ² na estação [R\$]	0,21	0,96	0,75

Dos resultados da Fig. 120 e Tabela 48, cabe destacar que:

- Arrefecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de consumo entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” é de 252,44 KWh. Por m² de área de pavimento, a diferença de custo entre os mesmos cenários analisados é de R\$ 0,75;

Nota: O consumo energético para Curitiba, na estação do verão, é 10 vezes maior que o consumo registrado na estação de inverno, verificado para o “Pior cenário”

7.4.4. RECIFE

Na Fig. 121 apresentam-se os resultados do consumo energético para Recife, na estação de verão, com duração de 8 meses (5832 horas).

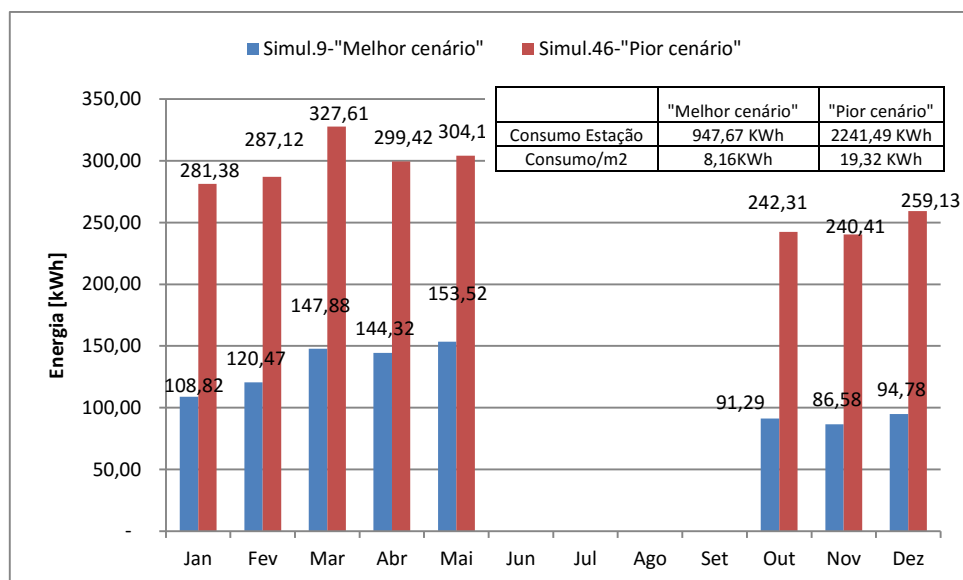


Fig. 121 - Consumo energético de arrefecimento na estação de verão para Recife.

Da análise da Fig. 121, é possível constatar que:

- Março é o mês com maior consumo energético para os dois cenários: "Melhor cenário" e "Pior cenário", segundo análise;
- A aplicação de isolamento térmico nas paredes e cobertura facultaria uma economia energética de aproximadamente 180 kWh no mês de maior consumo para o cenário "Pior cenário".

Na Fig. 122 apresentam-se os custos mensais de energia para aquecimento em Recife. O custo calculado nesta Tese refere-se ao relativo à eletricidade, forma usual de arrefecer e aquecer no Brasil. Para a eletricidade considerou-se o preço de R\$ 0,347/kWh.

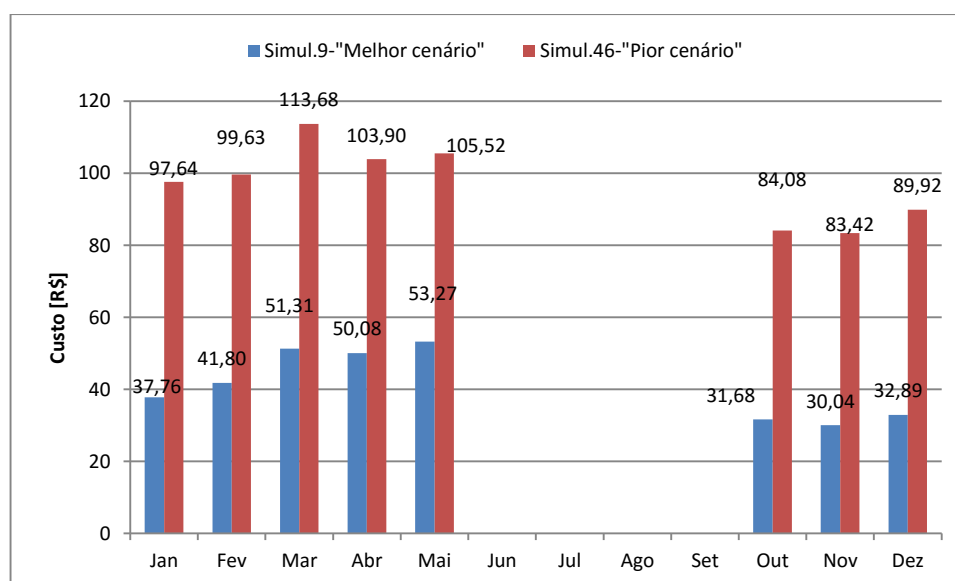


Fig. 122 - Custos de arrefecimento mensal, no verão, para Recife.

Na Tabela 49 apresentam-se os custos totais de arrefecimento e a diferença entre cenários “Pior cenário” (sem isolamento) e “Melhor cenário” (com isolamento).

Tabela 49 - Custos totais de energia de arrefecimento, no verão, para Recife.

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no verão para Recife			
Valores	“Melhor Cenário”	“Pior cenário”	Diferença entre os cenários
Totalização na estação KWh	947,67	2.241,49	1.293,82
Custo/m ² na estação [R\$]	2,83	6,70	3,87

Dos resultados da Fig. 122 e Tabela 49 é possível destacar:

- Arrefecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de custo entre o cenário “Melhor cenário” e “Pior cenário” vai além do dobro em todos os meses da estação em análise. A maior diferença de custo registrada está na análise do mês de março, com valor de R\$ 62,37 entre os cenários citados.
- Os primeiros cinco meses da estação em estudo são os que se apresentam como de maior custo energético, quando comparados aos demais meses, outubro, novembro e dezembro. A diferença de custos entre os cenários avaliados supera em todos os meses da estação, o valor de R\$ 50,00. Por m² de área de pavimento, a diferença de custo é de R\$ 3,87.

Nota: O consumo energético para Recife, na estação do verão, é aproximadamente 3 vezes maior que o consumo registrado na estação de inverno, verificado para o “Melhor cenário”.

Os resultados para Recife seguem a linha dos resultados da cidade de Petrolina, porém, devido às condições climáticas de Petrolina ser mais agravante que no Recife, a localização geográfica de Recife, é litorânea e Petrolina está na região do alto sertão pernambucano, portanto maiores percentuais de influência da umidade relativa do ar em Recife, contrariamente ao que se verifica para Petrolina, conduz a uma diferença de consumo energético pró Recife, da ordem de 400 kWh, quando se trata da análise do “Melhor cenário”.

7.4.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO CONSUMO ENERGÉTICO

Nesta fase, realizou-se uma análise comparativa da eficiência energética, para a estação de verão, entre os cenários simulados “Melhor cenário” e “Pior cenário”, para as 4 cidades do território nacional consideradas no estudo. Para o efeito, compararam-se os valores do consumo energético total, e por área de pavimento habitado.

Na Fig. 123 representam-se os valores de consumo energético total e na Fig. 124 os valores de consumo energético por m² da área de pavimento, dos cenários considerados como “Melhor cenário” e “Pior cenário”, para as quatro cidades na estação de verão.

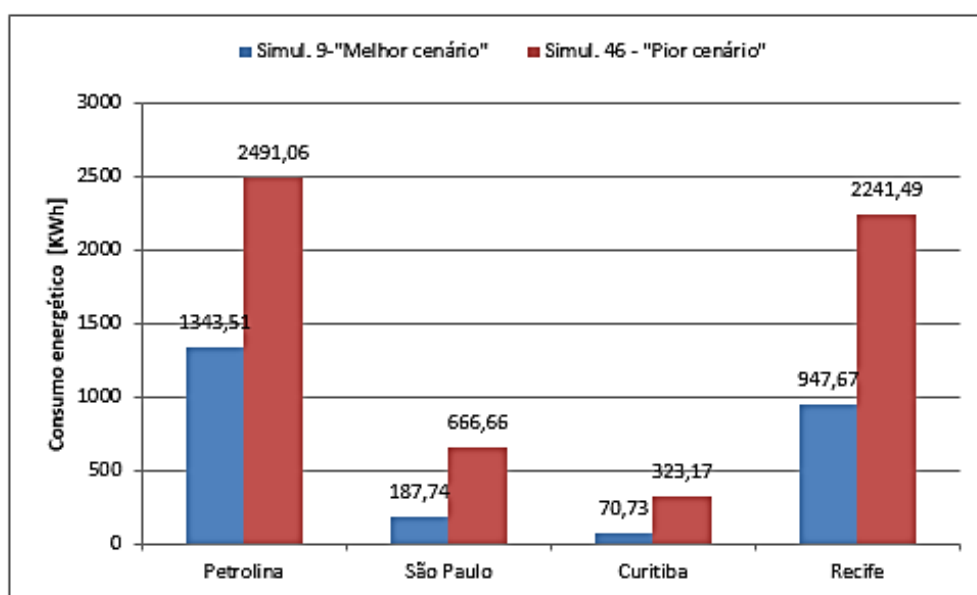


Fig. 123 - Consumo energético de arrefecimento no verão para as 4 cidades estudadas.

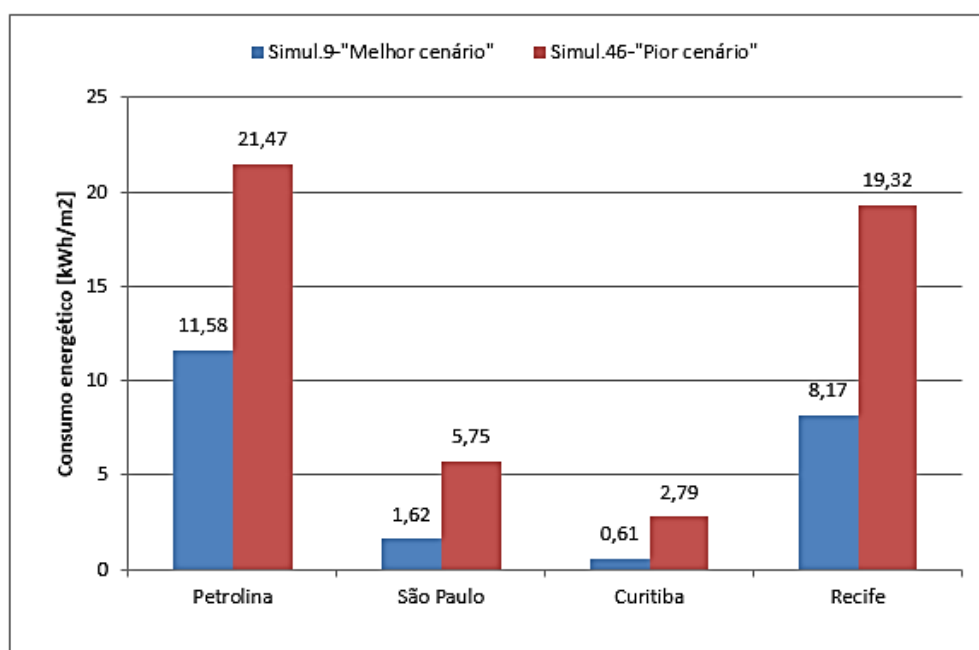


Fig. 124 - Consumo energético de arrefecimento por m², na estação de verão, para as 4 cidades estudadas.

Da análise dos resultados das Fig. 123 e Fig. 124, verifica-se que:

- Isolar as coberturas traduz uma estratégia fundamental nas edificações construídas no Brasil, em especial às construídas na região Nordeste do Brasil, como é o caso de Recife e Petrolina;
- O consumo energético do cenário “Melhor cenário”, com isolamento térmico em paredes e cobertura, mostra em todas as localizações, um menor consumo energético. A diferença entre o consumo do “Melhor cenário” (com isolamento) e “Pior cenário” (sem isolamento)

é máxima em Recife. Em termos de consumo total para o verão, a diferença é de 1294 kWh, e de consumo por m^2 de área de pavimento, é de $11,15 \text{ kWh/m}^2$. Em Curitiba, registrou-se a menor diferença, cujo valor, em termos de consumo total é de 253 kWh e de consumo por m^2 de área, é de $2,18 \text{ kWh/m}^2$;

- Petrolina é a segunda cidade que apresenta a maior diferença no consumo energético entre os cenários estudados, com 1148 kWh, que se traduz, numa diferença de consumo de $9,89 \text{ kWh/m}^2$. Por sua vez, São Paulo, é a localidade que ocupa a terceira maior posição em termos de diferença de consumo entre os cenários analisados, com 478 kWh, que pressupõe $4,13 \text{ kWh/m}^2$;
- A economia traduzida em poupança energética obtida entre o “Melhor cenário” (isolado paredes e cobertura) e “Pior cenário” (sem isolar paredes e cobertura), é de 85% em Petrolina; 250% em Curitiba; 136% para Recife e 256% em São Paulo.

Na Fig. 125 apresenta-se a representação gráfica do consumo energético por m^2 , de todas as localizações consideradas no estudo.

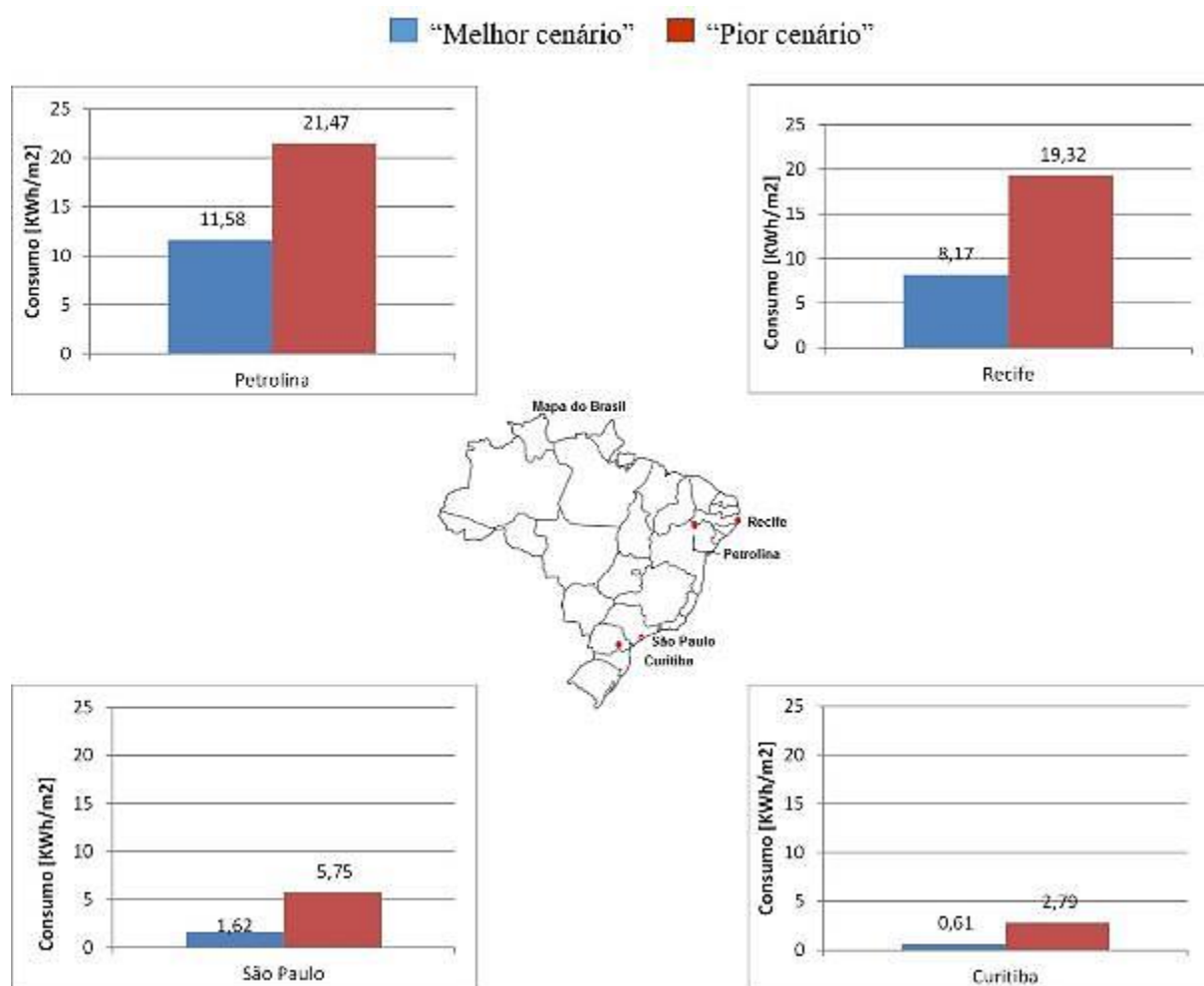


Fig. 125 - Representação gráfica do consumo energético de arrefecimento total por m^2 , da estação de verão, para as quatro cidades estudadas.

Dos resultados da Fig. 125 pode-se concluir de uma forma global, que:

- As temperaturas médias elevadas do clima na estação de verão em Petrolina implica num elevado consumo energético de arrefecimento por m² obtido nas simulações. Por outro lado, um menor consumo energético registrado para a cidade de Curitiba, com um registro de um clima mais ameno, determina diante dos dados apresentados, um consumo energético na estação de verão sem implicar grandes faturas.
- A eficácia do isolamento térmico de paredes e coberturas para este tipo de construção em gesso, possibilita uma poupança energética considerável como tem demonstrado nos cenários com isolamento (“Melhor cenário”). Foi possível obter índices percentuais superiores a 100% em 75% das cidades analisadas, à exceção de Petrolina, onde se registrou 85%.

7.5. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO (IDTP –V)- VERÃO

O desenvolvimento de um Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Verão (IDTP – V), que quantifica o somatório de graus-hora [°C.h] acima da temperatura de conforto de referência de 25 °C, é uma relevante forma de estabelecer um novo conceito de avaliar o desconforto térmico de uma edificação, esteja essa edificação construída ou na fase de projeto.

Os resultados apresentados fazem um comparativo entre os valores obtidos nas simulações dos cenários denominados “Melhor cenário” e “Pior cenário”, com e sem isolamento térmico em paredes e cobertura respectivamente. São apresentados os resultados para a casa de gesso-tipo na sua globalidade, resultante da média aritmética de 6 zonas térmicas avaliadas e com a casa em serviço, ocupada durante a semana e nos finais de semana no período integral, com maior predominância de pessoas à partir das 18:00h, referente ao final do período laboral.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados para Petrolina, São Paulo, Curitiba e Recife.

7.5.1. IDTP-V PARA PETROLINA-PE

Na Fig. 126 e Tabela 50 apresentam-se os resultados do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Verão (IDTP – V), de Petrolina, durante o período de aquecimento, 8 meses (5832 horas). A Figura 126 é relativa ao IDTP – V para o edifício-tipo (média de todas as zonas térmicas).

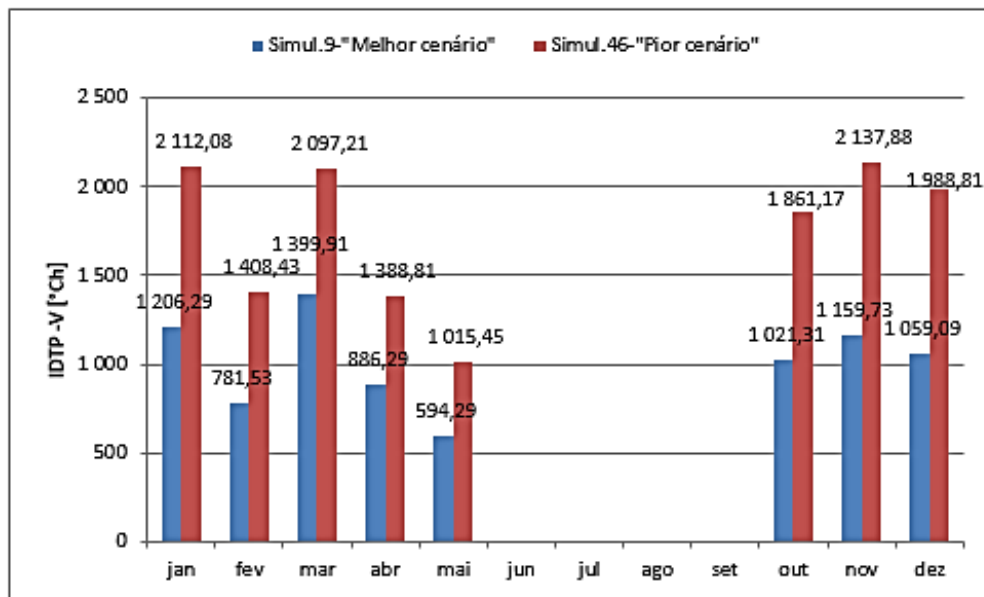


Fig. 126 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para Petrolina.

Tabela 50 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para Petrolina

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-V – [°C.h]	8.108,43	14.009,83	5.901,40

Dos resultados apresentados para o IDTP – V, na Fig.126 e na Tabela 50 destaca-se:

- O cenário “Pior cenário” (sem isolamento térmico de paredes e cobertura) possui o IDTP – V mais elevado para todos os meses da estação de verão, enquanto o cenário “Melhor cenário” (com isolamento térmico em paredes e cobertura) possui o menor IDTP – V, com destaque neste caso, para o mês de maio, com o menor dentre os registros para toda a estação;
- A diferença global entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” é de 5901°C.h, o que significa que a colocação de isolamento térmico conjuntamente em paredes e coberturas permite reduzir o IDTP – V em, aproximadamente, 72%. Entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário”, (com isolamento e sem isolamento de paredes e cobertura), os meses de novembro e dezembro apresentam as maiores diferenças, 978°C.h e 929°C.h respectivamente;
- O menor registro para o IDTP-V refere-se ao mês de maio com 594°C.h, para o “Melhor cenário”, enquanto que o maior registro é verificado no mês de março com 1399°C.h. A diferença entre os valores de IDTP – V dos meses analisados é maior que 100%.

Os resultados obtidos demonstram que os cenários com isolamento apresentam um IDTP – V inferior ao dos cenários sem isolamento, verificando-se, maior influência por parte do isolamento térmico quando combinados paredes e cobertura.

7.5.2. IDTP-V PARA SÃO PAULO-SP

Na Fig. 127 e na Tabela 51 apresentam-se os resultados do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Verão (IDTP – V), de São Paulo, durante o período de verão, 8 meses (5832 horas).

A Fig. 127 e a Tabela 51 são relativos ao IDTP – V para a casa de gesso-tipo.

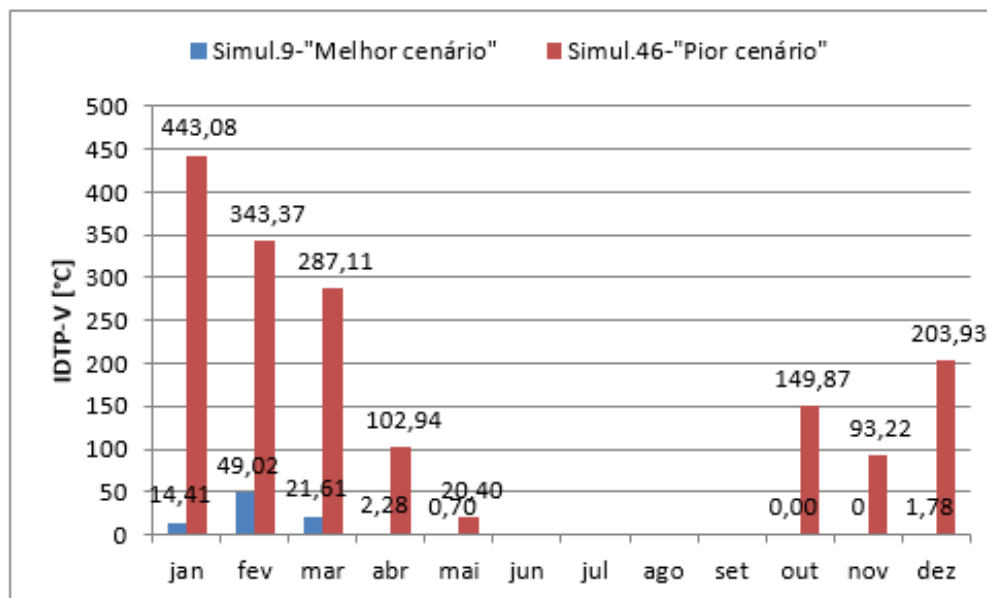


Fig. 127 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para São Paulo.

Tabela 51 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para São Paulo.

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-V – [°Ch]	89,81	1.643,92	1.554,11

Dos resultados apresentados para o IDTP-V, na Fig. 127 e na Tabela 51

- O cenário “Pior cenário” (sem isolamento térmico de paredes e cobertura) possui o IDTP – V mais elevado para todos os meses da estação de verão, enquanto o cenário “Melhor cenário” (com isolamento térmico em paredes e cobertura) possui o menor IDTP – V, com destaque neste caso, para os meses de abril, maio, outubro, novembro e dezembro com os valores e nulos dentre os registros para toda a estação;
- A diferença global entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” é de 1554°C.h, o que significa que a colocação de isolamento térmico em paredes e coberturas permite reduzir o IDTP – V de forma substancial;
- O maior registro para o IDTP-V refere-se ao mês de maio com 49°C.h, para o “Melhor cenário”, enquanto que o maior registro é verificado no mês de janeiro com 443°C.h, para o “Pior cenário”.

Os resultados obtidos demonstram ser fundamental o isolamento de paredes e coberturas na referida estação, neste clima.

7.5.3. IDTP-V PARA CURITIBA-PR

Na Fig. 128 e na Tabela 52 apresentam-se os resultados do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Verão (IDTP – V), de Curitiba, durante o período de verão, 8 meses (5832 horas).

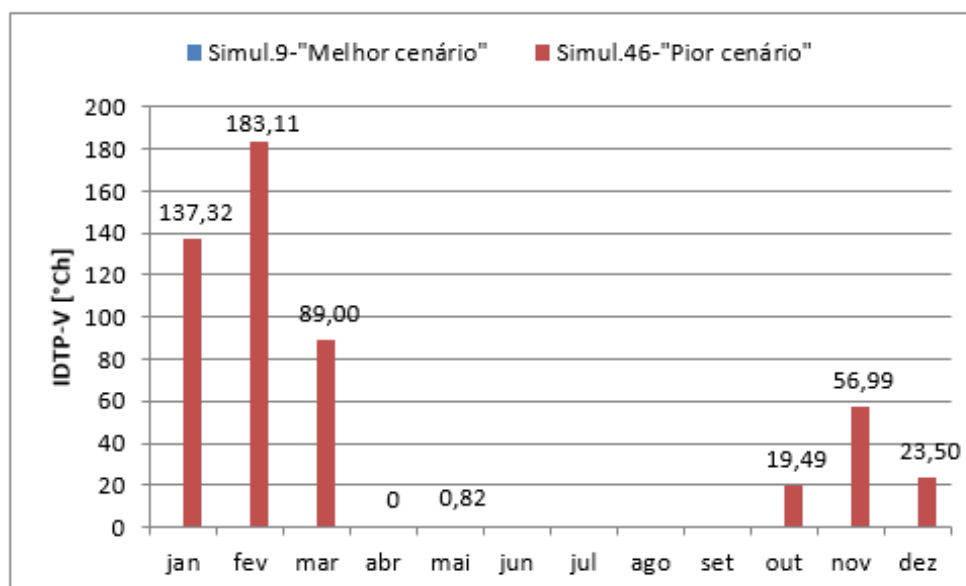


Fig. 128 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para Curitiba.

Tabela 52 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para Curitiba.

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-V – [°C.h]	0	510,24	510,24

Da análise dos resultados da Fig. 128 e da Tabela 52 verifica-se que:

- O cenário “Melhor cenário” (com isolamento de paredes e cobertura) apresenta resultados nulos nos registros verificados em toda a estação. Para o caso do “Pior cenário” (sem isolamento de cobertura e paredes), é possível destacar um IDTP-V elevado no mês de fevereiro em relação aos demais meses, registrando-se o mês de abril com valor de IDTP-V nulo, quando se analisa dos dois cenários;
- A diferença entre os cenários sem isolamento e com isolamento verificado na estação em análise, 510,24°C.h, é na globalidade referente ao cenário com ausência de isolamento total nas paredes e cobertura, conforme registros apresentados para Curitiba. É máxima para o mês de fevereiro, 183,11°C.h, e nulo para abril.

7.5.4. IDTP-V PARA RECIFE-PE

Na Fig. 129 e na Tabela 53 apresentam-se os resultados do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Verão (IDTP – V) de Recife, durante o período de verão, 8 meses (5832 horas).

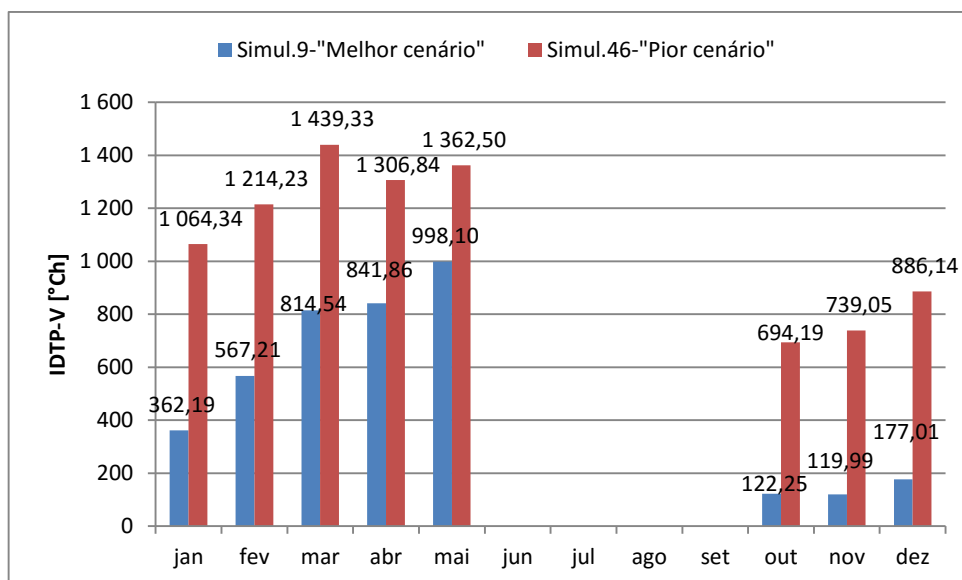


Fig. 129 - Indicador de desconforto térmico de verão (IDTP-V) para Recife.

Tabela 53 - Valores de IDTP-V globais na estação de verão para Recife.

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-V – [°C.h]	4.003,15	8.706,63	4.703,48

Da análise dos resultados da Fig. 129 e da Tabela 53, é possível verificar que:

- O cenário “Pior cenário” (sem isolamento térmico de paredes e cobertura) possui o IDTP – V mais elevado para todos os meses da estação de verão, enquanto o cenário “Melhor cenário” (com isolamento térmico em paredes e cobertura) possui o menor IDTP – V. O mês de março registra o maior valor para o cenário “Pior cenário”, 1439,33°C.h, e em outubro registra-se o menor, 694,19°C.h, para o mesmo cenário estudado;
- A diferença global entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” é de 4703°C.h, o que significa que a colocação de isolamento térmico conjuntamente em paredes e coberturas permite melhor resultado para o IDTP – V em um percentual superior a 100%;
- O maior registro para o IDTP-V refere-se ao mês de maio com 998,1°C.h, para o “Melhor cenário”, enquanto que o menor registro é verificado no mês de novembro com 119,99°C.h.

7.5.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO DE VERÃO – IDTP-V

Realizou-se uma análise comparativa do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Verão (IDTP – V), para as quatro cidades do território brasileiro consideradas no estudo. Para tal, compararam-se os valores do IDTP – V para a casa de gesso-tipo, Fig. 130 e Tabela 54.

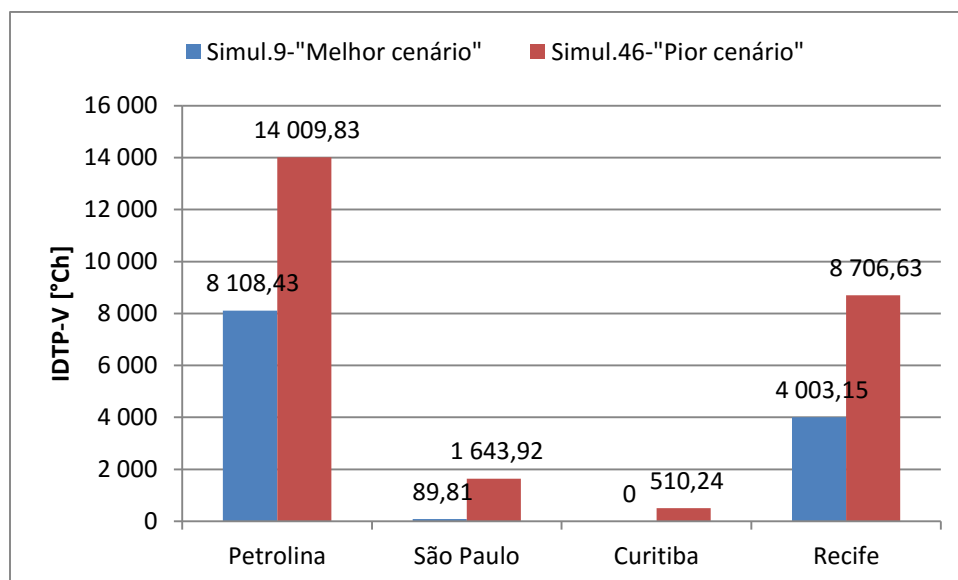


Fig. 130 - Indicador de Desconforto Térmico Passivo de verão para as quatro cidades estudadas.

Tabela 54 - Valores de IDTP-V globais para as quatro cidades em estudo.

	Simul.9 - "Melhor cenário"	Simul.46 - "Pior cenário"	Diferença
Petrolina	8.108,43	14.009,83	5.901,40
São Paulo	89,81	1.643,92	1.554,11
Curitiba	0	510,24	510,24
Recife	4.003,15	8.706,63	4.703,48

Da análise dos resultados da Fig. 130 e da Tabela 54, é possível verificar que:

- Os cenários “Pior cenário” (sem isolamento de paredes e cobertura) possuem em todas as localizações o maior IDTP – V, com valor máximo para Petrolina com 14009°C.h, e mínimo para Curitiba, 510°C.h. Quando a análise referencia o cenário “Melhor cenário”, o menor valor do IDTP-V são os registros para São Paulo e Curitiba com 89,81°C.h e 0°C.h respectivamente. Os valores apresentados para as duas cidades são justificados pelas condições climáticas mais satisfatórias, quando comparadas às condições de Recife e Petrolina;
- A diferença, devido à aplicação de isolamento térmico, entre os cenários é maior em Petrolina, com 5901,40°C.h, seguida de Recife, com 4703,48°C.h, São Paulo, com 1554,11°C.h, e por último para a cidade de Curitiba com 510,24°C.h;
- A redução do IDTP – V, devido à aplicação de isolamento térmico demonstra que o IDTP-V em Petrolina supera o IDTP-V de Recife em mais de 100%, quando a análise é feita para o “Melhor cenário”.

Na Fig. 131 apresenta-se a representação gráfica do IDTP – V para o edifício-tipo durante a estação do verão para as quatro cidades.

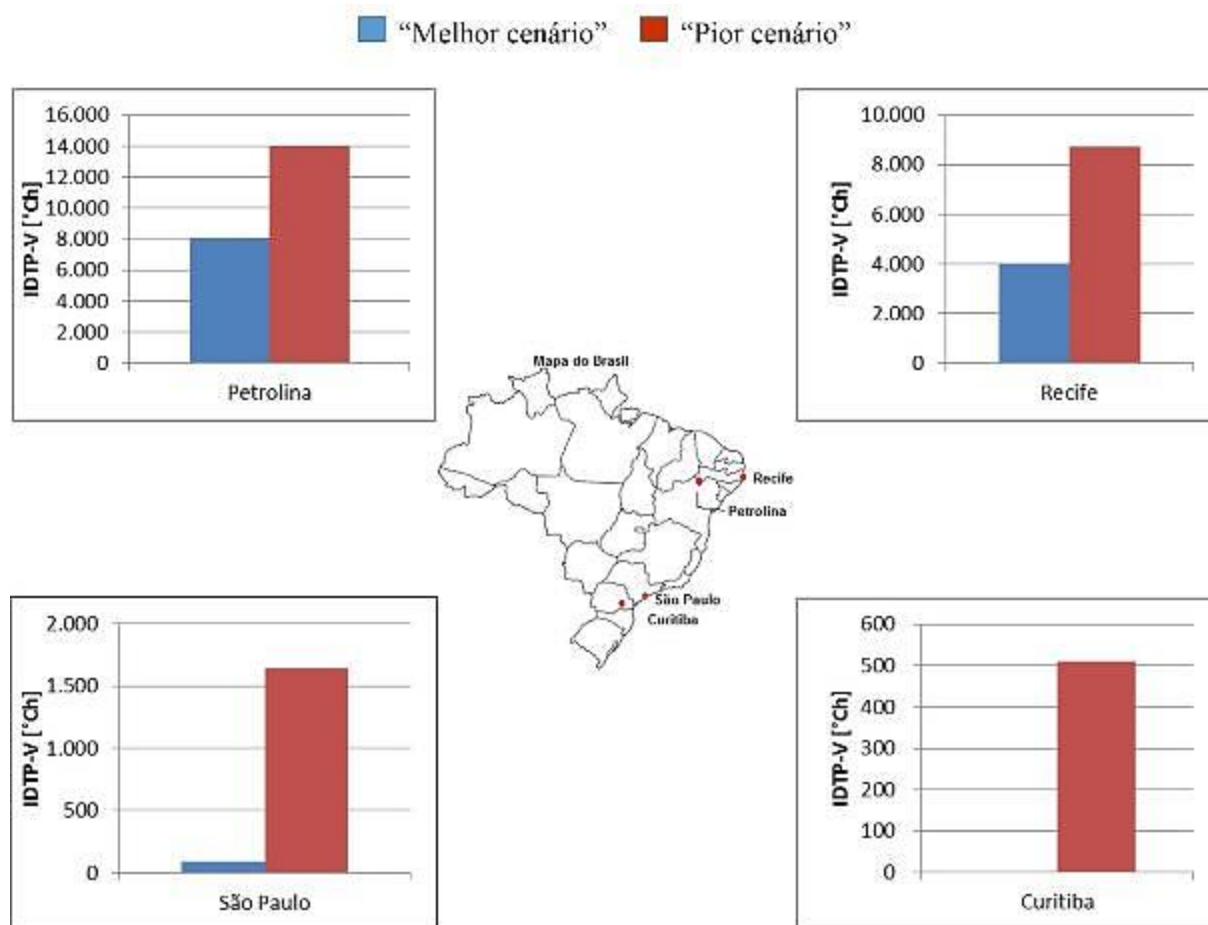


Fig. 131 - Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico Passivo – IDTP-V, para as quatro cidades estudadas

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- O isolamento térmico de paredes e cobertura conduz a um IDTP – V menor, proporcionando um nível de conforto superior, observado na estação de verão em todas as localidades estudadas, obtendo um cenário nulo em Curitiba, indicando uma situação ideal de conforto para a cidade;
- A influência do isolamento térmico é, como se esperava, maior na localidade de Petrolina, a cidade possui um clima mais agressivo na estação de verão, com temperaturas elevadas, como indicam as diferenças entre o IDTP – V dos cenários com isolamento e sem isolamento. Por sua vez, a cidade de Curitiba foi a que apresentou um efeito do isolamento com menor impacto;
- O IDTP – V ideal, nulo, foi alcançado em regime de livre flutuação da temperatura, apenas isolando a cobertura e paredes da casa de gesso-tipo.

7.6. CONSUMO ENERGÉTICO PARA ARREFECIMENTO NA ESTAÇÃO DE INVERNO

A quantificação do consumo energético na estação de inverno no Brasil configura outro fator em que se baseia na opção de isolar ou não as paredes exteriores, sombrear ou não as aberturas, enfim adotar estratégias de condicionamento passivo que possa minimizar o consumo nesse curto período. Através do programa avançado WUFIPlus obtiveram-se os resultados de necessidades energéticas para os quatro meses da estação do inverno, necessários à obtenção do conforto térmico.

Os resultados apresentados referem-se ao somatório da necessidade energética das zonas térmicas simulada da casa de gesso-tipo, culminando no total da fatura energética.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados das necessidades energéticas para Petrolina, São Paulo, Recife e Curitiba, com base nas simulações que representam o “Melhor cenário” e “Pior cenário”, como fora apresentado nos capítulos de forma similar na estação de verão.

7.6.1. PETROLINA

Na Fig. 132 apresentam-se os resultados do consumo energético para arrefecimento em Petrolina, durante o período de inverno, com duração de 4 meses (2928 horas).

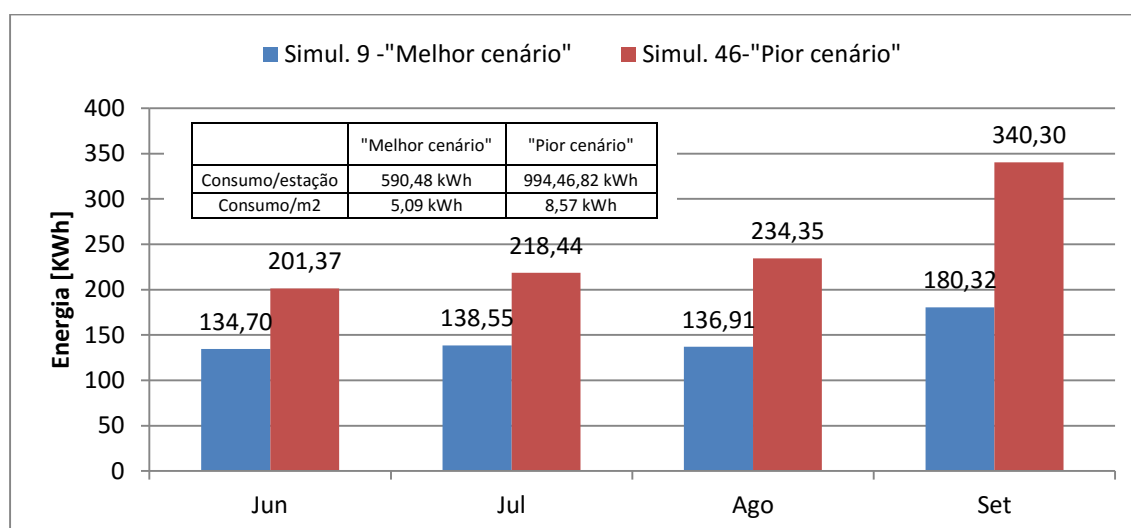


Fig. 132 - Consumo energético de arrefecimento na estação de inverno para Petrolina

Da análise da Fig. 132 constata-se que:

- Junho é o mês com menor consumo energético para os cenários “Pior cenário” (paredes e cobertura sem isolamento) e “Melhor cenário” (Isolado paredes e cobertura), e Setembro apresenta-se como o mês de maior consumo;
- A aplicação concomitante de isolamento térmico nas paredes e coberturas proporciona uma diferença de consumo considerável. Em termos de consumo total, é de 590,48 kWh, e por m² é de 5,09 kWh/m², considerando uma área habitável de 116m²;
- A colocação de isolamento permite uma poupança energética de aproximadamente 68% no consumo energético por área quadrada.

Na Fig. 133, apresentam-se os custos mensais de energia para arrefecimento em Petrolina. Estes custos são relativos à utilização de aparelhos comerciais de ar condicionado, sendo esta uma forma usual de

arrefecer as residências, especialmente na região Nordeste do Brasil. Quantificou-se o custo para este tipo de demanda energética por razões já explícitas, tendo como base o valor de R\$ 0,347/kWh.

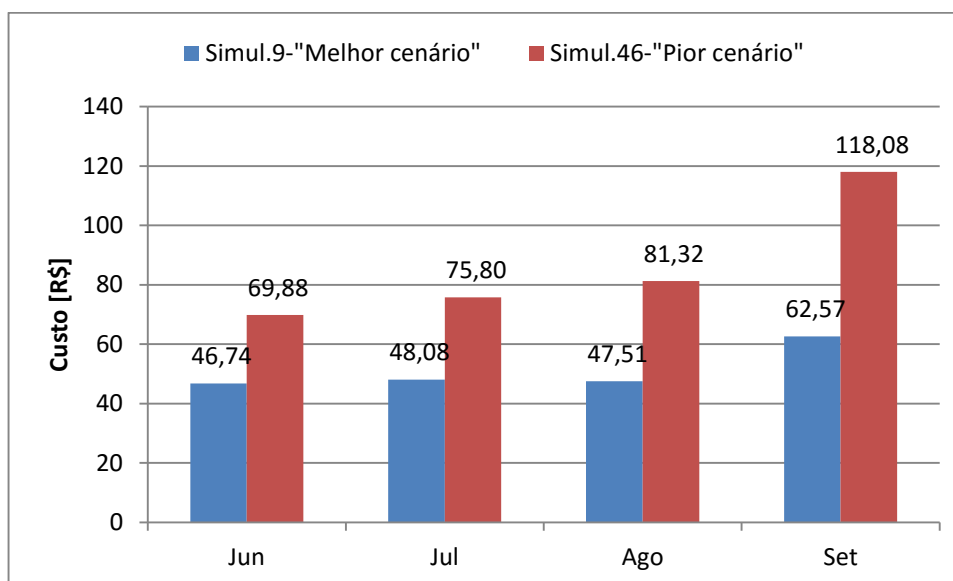


Fig. 133 - Custo de Energia mensal para arrefecimento no inverno para Petrolina

Tabela 55 - Custos totais de energia para arrefecimento no inverno para Petrolina

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no inverno para Petrolina			
Valores	"Melhor Cenário"	"Pior cenário"	Diferença entre os cenários
Totalização na estação [kWh]	590,48	994,46	403,98
Custo/m ² na estação [R\$]	1,76	2,97	1,21

Dos resultados da Fig. 133 e da Tabela 55, é possível concluir que:

- Arrefecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de consumo, entre os cenários "Melhor cenário" e "Pior cenário", chega a atingir um valor de 403,98 kWh para os registros na estação;
- Retirando-se o isolamento de paredes e coberturas do "Melhor cenário", implica elevar o custo energético em mais de 60% na estação de inverno, verificado nos custos por m² de energia consumida.

Convém ressaltar pelos resultados apresentados, que nesta estação, há uma influência relevante do isolamento da cobertura e paredes no "Melhor cenário" em relação ao "Pior cenário".

7.6.2. SÃO PAULO

Na Fig. 134 apresentam-se os resultados do consumo energético para arrefecimento em São Paulo, para a estação de inverno, com duração de 4 meses (2928 horas).

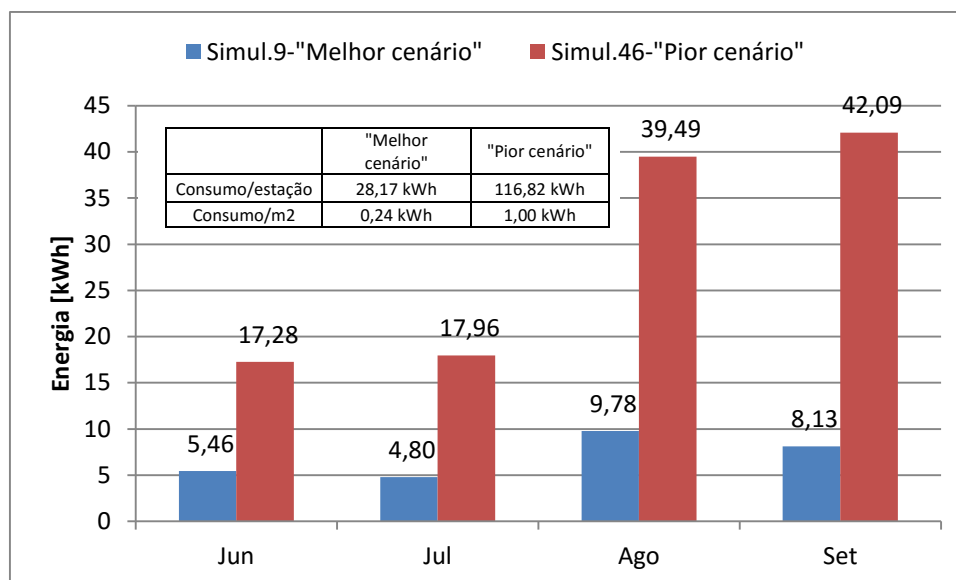


Fig. 134 - Consumo energético para arrefecimento na estação de inverno para São Paulo.

Da análise da Fig. 134 constata-se que:

- Agosto e Setembro são os meses com maior consumo energético para o cenário considerado "Pior cenário";
- A aplicação de isolamento térmico nas paredes e cobertura é capaz de proporcionar uma diferença de consumo considerável. Em termos de consumo total a diferença é de 88,65 kWh, e por m² de área de pavimento, é de 0,76 kWh/m²;
- Isolar paredes e coberturas na cidade de São Paulo permite uma redução no consumo energético em percentuais que superam 300% na estação de inverno.

Na Fig. 135 apresentam-se os custos mensais de energia elétrica para arrefecimento no inverno em São Paulo. Vale salientar que os resultados apresentados para energia elétrica tem como base, ser esta a forma mais usual na matriz energética brasileira. Para a eletricidade considerou-se o preço de R\$ 0,347/kWh.

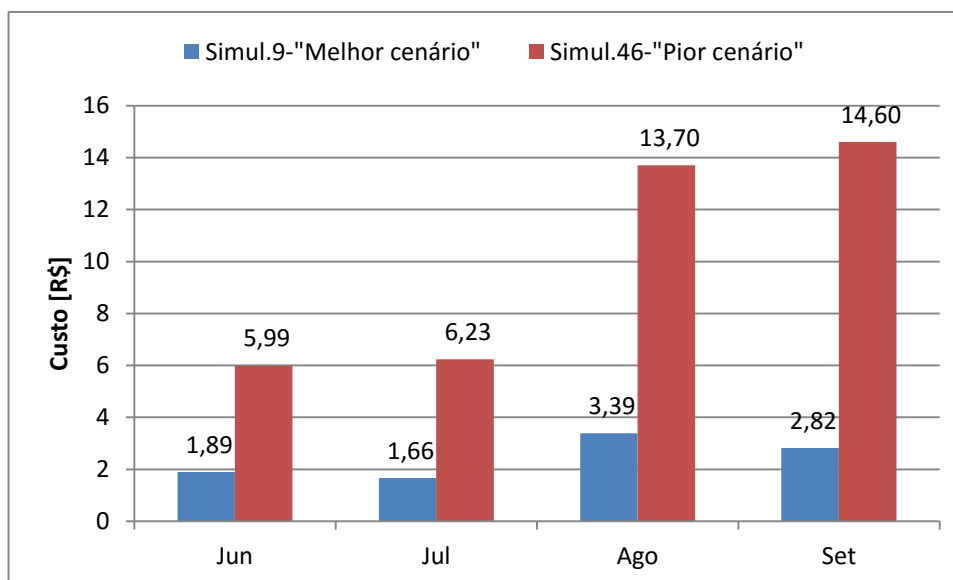


Fig. 135 - Custo de energia de arrefecimento mensal para São Paulo

Na Tabela 56 apresentam-se os custos totais de arrefecimento e a diferença entre cenários sem isolamento ("Pior cenário") e com isolamento ("Melhor cenário").

Tabela 56 - Custos totais de energia, no inverno, para São Paulo

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no inverno para São Paulo			
Valores	"Melhor Cenário"	"Pior cenário"	Diferença entre os cenários
Totalização na estação [KWh]	28,17	116,82	88,65
Custo/m ² na estação [R\$]	0,08	0,34	0,26

Dos resultados da Fig. 135 e Tabela 56, podemos destacar:

- Arrefecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de consumo entre os cenários "Melhor cenário" e "Pior cenário" é de 88,65 kWh. A diferença de custo Por m² de área de pavimento entre os cenários analisados é de R\$ 0,26/m²;
- É possível uma redução de R\$ 10,31 e R\$ 11,78 no custo com energia elétrica nos meses de Agosto e setembro, quando se isola as paredes e cobertura da casa de gesso neste clima e estação.

7.6.3. CURITIBA

Na Fig. 136 apresentam-se os resultados do consumo energético para arrefecimento em Curitiba, na estação de inverno, com duração de 4 meses (2928 horas).

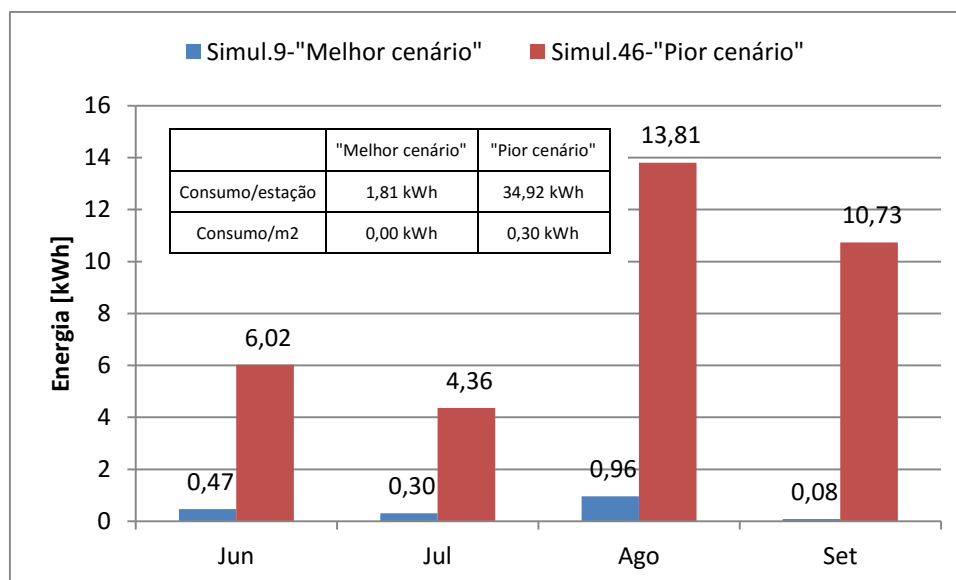


Fig. 136 - Consumo energético para arrefecimento na estação de inverno para Curitiba

Da análise da Fig. 136 constata-se que:

- Agosto e Setembro são os meses com maior consumo energético para o cenário representativo do "Pior cenário" em análise;
- A aplicação de isolamento térmico nas paredes e coberturas neste clima é capaz de proporcionar uma diferença de consumo significativa, muito embora, o consumo mesmo sem isolamento seja considerado insignificante na estação como um todo;
- A poupança energética atingida com a colocação de isolamento térmico nas paredes e cobertura é relevante em toda a estação, com valor não muito elevado no mês de agosto, quase anulando o consumo.

Na Fig. 137 apresentam-se os custos mensais de energia para arrefecimento em Curitiba no inverno. Novamente vale ressaltar que a forma aqui explícita, refere-se para o cálculo de energia elétrica, por ser esta a fonte energética mais usual para aquecer ou arrefecer no Brasil.

Para a eletricidade considerou-se o valor de R\$ 0,347/kWh, cujo preço é o praticado pela companhia distribuidora de energia do Paraná.

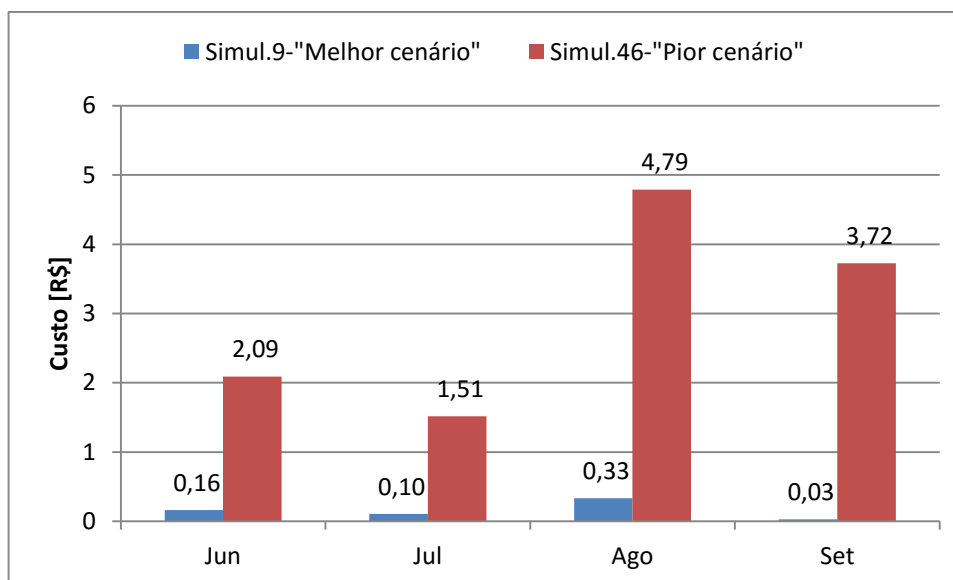


Fig. 137 - Custos de energia para arrefecimento no inverno em Curitiba.

Na Tabela 57 apresentam-se os custos totais de arrefecimento e a diferença entre os cenários “Pior cenário” (sem isolamento) e “Melhor cenário” (com isolamento).

Tabela 57 - Custos totais de energia para arrefecimento, no inverno, para Curitiba

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no inverno para Curitiba			
Valores	“Melhor Cenário”	“Pior cenário”	Diferença entre os cenários
Totalização na estação [kWh]	1,81	34,92	33,11
Custo/m ² na estação [R\$]	0,00	0,10	0,10

Dos resultados da Fig. 137 e Tabela 57, cabe destacar que:

- Arrefecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de consumo entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” é de 33,11kWh. Por m² de área de pavimento, a diferença de custo entre os mesmos cenários analisado é de R\$ 0,10.

7.6.4. RECIFE

Na Fig. 138 apresentam-se os resultados do consumo energético para arrefecimento em Recife, na estação de inverno, com duração de 4 meses (2928 horas).

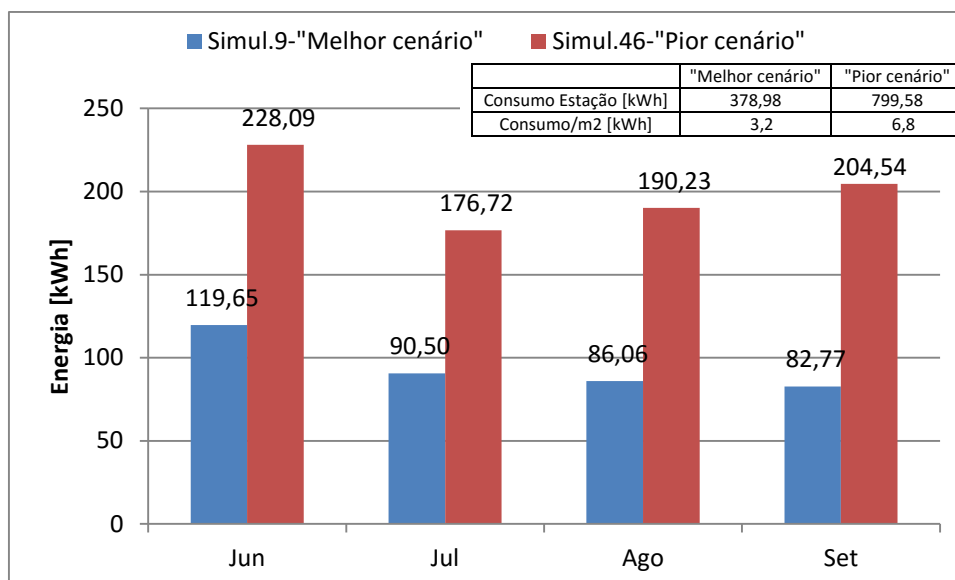


Fig. 138 - Consumo energético na estação do inverno em Recife

Da análise da Fig. 138, é possível constatar que:

- Julho é o mês de menor consumo energético para o cenário “Pior cenário”, e setembro é o de menor consumo para o “Melhor cenário”;
- A aplicação de isolamento térmico nas paredes e cobertura faculta uma economia energética no mês de junho, de aproximadamente 91%;
- A colocação de isolamento permite uma poupança energética de, aproximadamente, 110%, quando contabilizado todo o consumo da estação de inverno.

Na Fig. 139 apresentam-se os custos mensais de energia para arrefecimento em Recife. O custo calculado nesta Tese refere-se ao relativo à eletricidade, forma mais usual de arrefecer ou aquecer no Brasil. Para a eletricidade considerou-se o preço de R\$ 0,347/kWh.

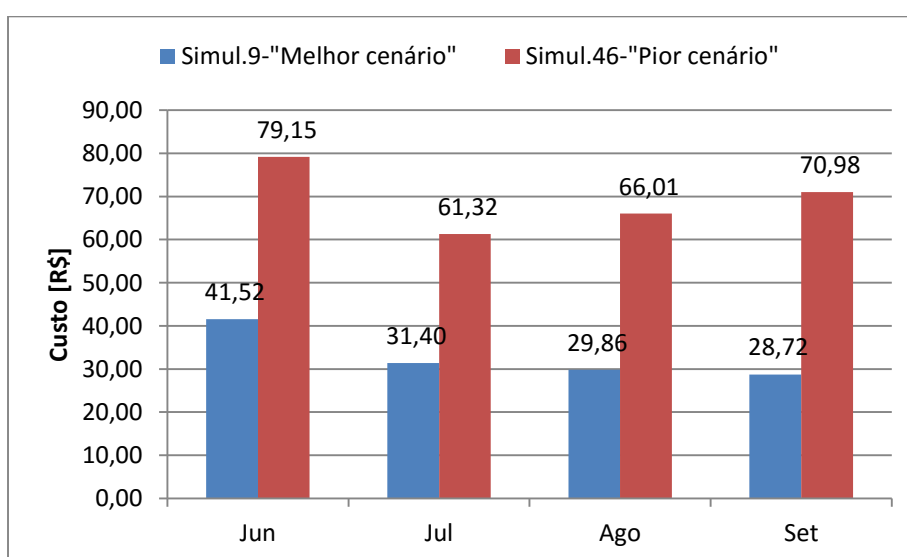


Fig. 139 - Custos de arrefecimento mensal, no inverno, para Recife

Na Tabela 58 apresentam-se os custos totais de arrefecimento e a diferença entre cenários “Pior cenário” (sem isolamento) e “Melhor cenário” (com isolamento).

Tabela 58 - Custos totais de energia, no inverno, para Recife.

Custos Totais de Energia de Arrefecimento no inverno para Recife			
Valores	“Melhor Cenário”	“Pior cenário”	Diferença entre os cenários
Totalização na estação [kWh]	378,98	799,58	420,60
Custo/m ² na estação [R\$]	1,13	2,39	1,26

Dos resultados da Fig. 139 e Tabela 58 é possível destacar:

- Arrefecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de custo entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” vai além do dobro em 50% dos meses da estação em análise. A maior diferença de custo registrada está na análise do mês de Junho, com valor de R\$ 37,63 entre os cenários citados.
- O mês de menor custo energético é registrado para o mês de julho. Quando comparados os dois cenários, a diferença é de R\$ 29,92. Por m² de área de pavimento, a diferença de custo na estação total, é de R\$ 1,26.

Os resultados do consumo energético na estação de inverno para Recife e Petrolina, analogamente aos resultados apresentados no verão, seguem uma mesma linha com custos e consumos mais elevados, quando comparados às cidades de Curitiba e São Paulo, com custos e consumos relativamente inferiores.

7.6.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO CONSUMO ENERGÉTICO DE ARREFECIMENTO

Para verificar a influência da localização no território nacional no consumo energético de arrefecimento na estação de inverno, realizou-se uma análise comparativa da eficiência energética entre os cenários simulados “Melhor cenário” e “Pior cenário”, para as 4 cidades consideradas. Para o efeito, compararam-se os valores do consumo energético total, e por área de pavimento habitado.

Na Fig. 140 representam-se os valores de consumo energético total e na Fig. 141 os valores de consumo energético por m² da área de pavimento, dos cenários considerados como “Melhor cenário” e “Pior cenário”, para as quatro cidades na estação de inverno.

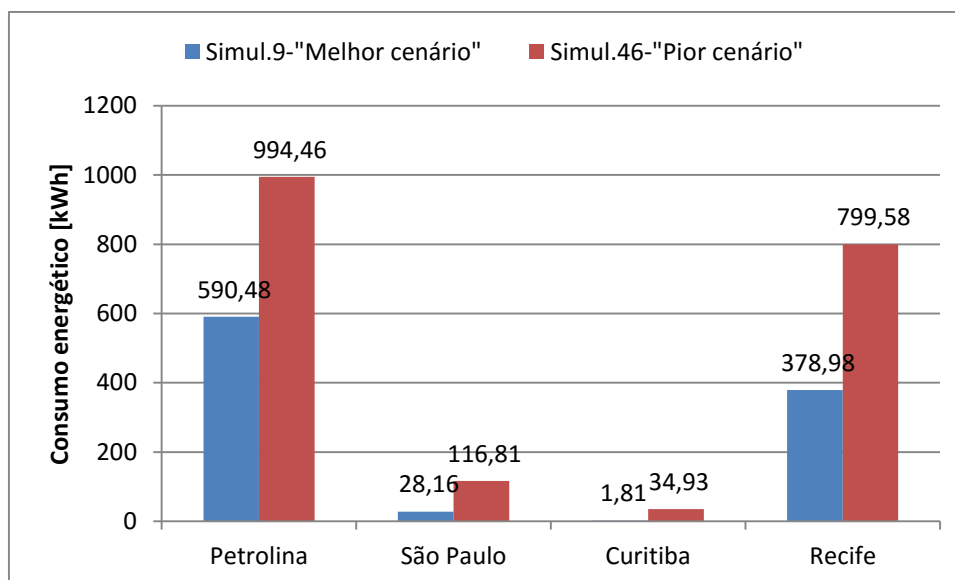


Fig. 140 - Consumo energético para arrefecimento, no inverno, para as 4 cidades estudadas.

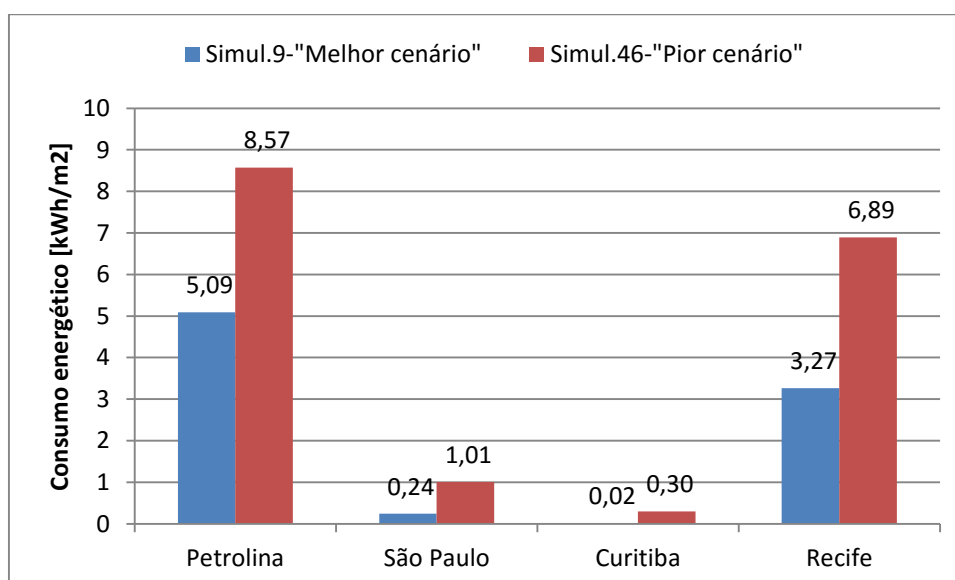


Fig. 141 - Consumo energético para arrefecimento por m², na estação de inverno, para as 4 cidades estudadas.

Da análise dos resultados das Fig. 140 e Fig. 141, verifica-se que:

- Isolar as coberturas no inverno traduz uma estratégia fundamental nas edificações no Brasil;
- O consumo energético do cenário “Melhor cenário”, com isolamento térmico em paredes e cobertura, mostra em todas as localizações, um menor consumo energético. A diferença entre o consumo energético por m² do “Melhor cenário” (com isolamento) e “Pior cenário” (sem isolamento) é em Recife, 3,62 kWh/m² e Petrolina 3,48 kWh/m². São mínimas para o “Pior cenário” em São Paulo e Curitiba, e quase nulas para o “Melhor cenário” nas duas cidades;

- Os resultados da análise demonstram que pode haver necessidades de aquecimento para as cidades de Curitiba e São Paulo na estação de inverno, o que não se pode afirmar para as cidades de Petrolina e Recife.

Na Fig. 142 apresenta-se a representação gráfica do consumo energético por m^2 , de todas as localizações consideradas no estudo.

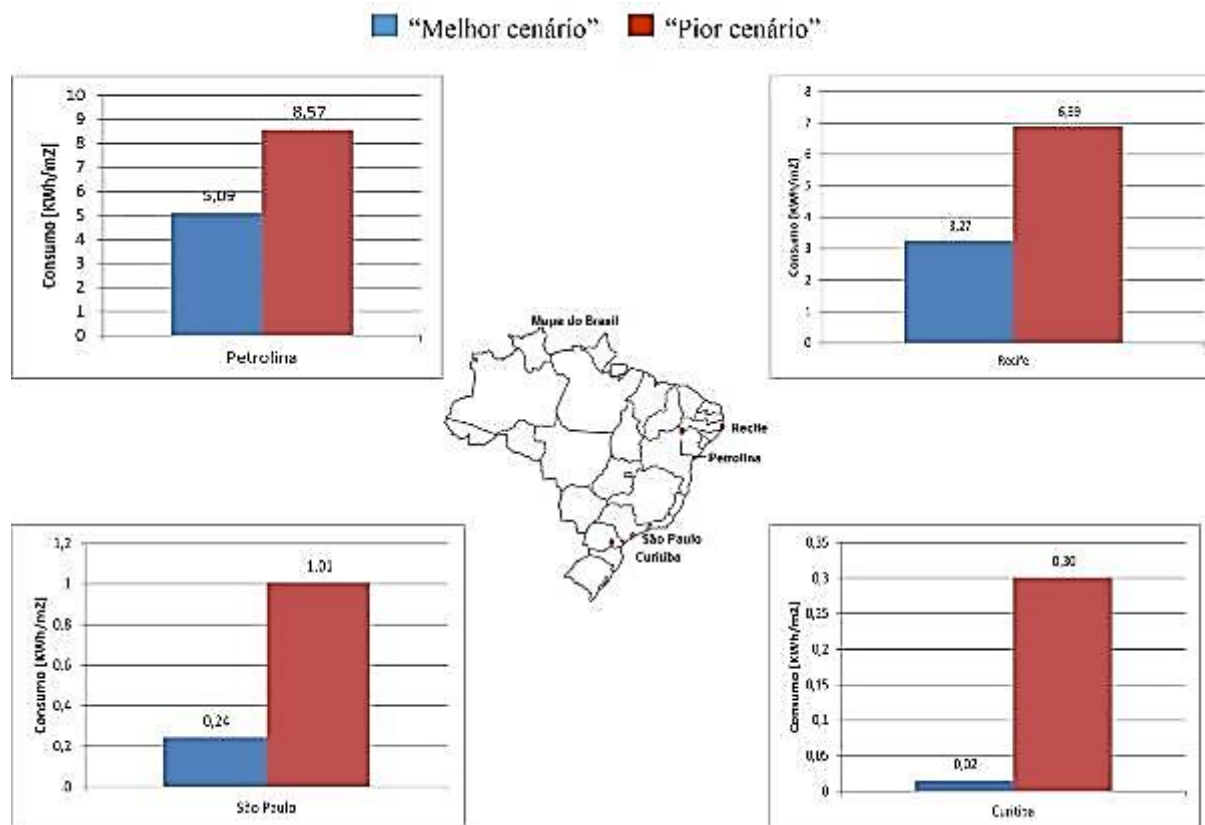


Fig. 142 - Representação gráfica do consumo energético de aquecimento total por m^2 , na estação de inverno, para as quatro cidades estudadas.

Dos resultados da Fig. 142 pode-se concluir de uma forma global, que:

- A severidade climática vivenciada em Petrolina fez com que o consumo energético de aquecimento na estação de inverno se mostrasse superior às demais cidades analisadas na estação. Por outro lado, é possível perceber um consumo energético de aquecimento insignificante registrado para as cidades de Curitiba e São Paulo devido às condições climáticas mais favoráveis.
- A eficiência do isolamento térmico de paredes e coberturas para este tipo de construção em gesso possibilita uma poupança energética considerável, mesmo estando ciente que os consumos apresentados à exceção de Petrolina e Recife são insignificantes do ponto de vista econômico. Todos os cenários analisados demonstraram ser possível obter percentuais superiores ou próximos a 100% em 75% das cidades analisadas, à exceção de Petrolina, com valores próximos dos 70%, quando se compara os cenários com e sem isolamento.

7.7. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO (IDTP-I)- INVERNO

Para esta estação de inverno, a avaliação se deu de forma análoga ao procedimento adotado para a estação de verão. Através de um Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Inverno (IDTP – I), que quantifica o somatório de graus-hora abaixo da temperatura de conforto de referência de 20 °C. Os resultados apresentados fazem um comparativo entre os valores do IDTP-I obtidos nas simulações dos cenários denominados “Melhor cenário” e “Pior cenário”, com e sem isolamento térmico em paredes e cobertura respectivamente. São apresentados os resultados para a casa de gesso na sua globalidade, resultante da média aritmética de 6 zonas térmicas avaliadas, de forma como foi apresentado na estação de verão.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados para Petrolina, São Paulo, Curitiba e Recife.

7.7.1. IDTP-I PARA PETROLINA

Na Tabela 59 apresentam-se os resultados do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Inverno (IDTP – I) para Petrolina durante o período 4 meses (2928 horas). O clima de Petrolina apresenta uma temperatura média diária de 25,7°C (Tabela 35), o que culmina na nulidade desta análise para uma temperatura do ar de 20°C.

Tabela 59 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para Petrolina

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-I – [°C.h]	0	0	0

Da análise dos resultados da Tabela 59, verifica-se que:

- Em uma análise para o “Melhor cenário” (com isolamento de paredes e cobertura) e o “Pior cenário” (sem isolamento de paredes e cobertura), é possível perceber que não há desconforto por frio para esta cidade e para este clima.

7.7.2. IDTP-I PARA SÃO PAULO

Na Fig. 143 e na Tabela 60 apresentam-se os resultados do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Inverno (IDTP – I), de São Paulo, durante o período de inverno, 4 meses (2928 horas).

A Fig. 143 e a Tabela 60 são relativos ao IDTP – I para a casa de gesso-tipo.

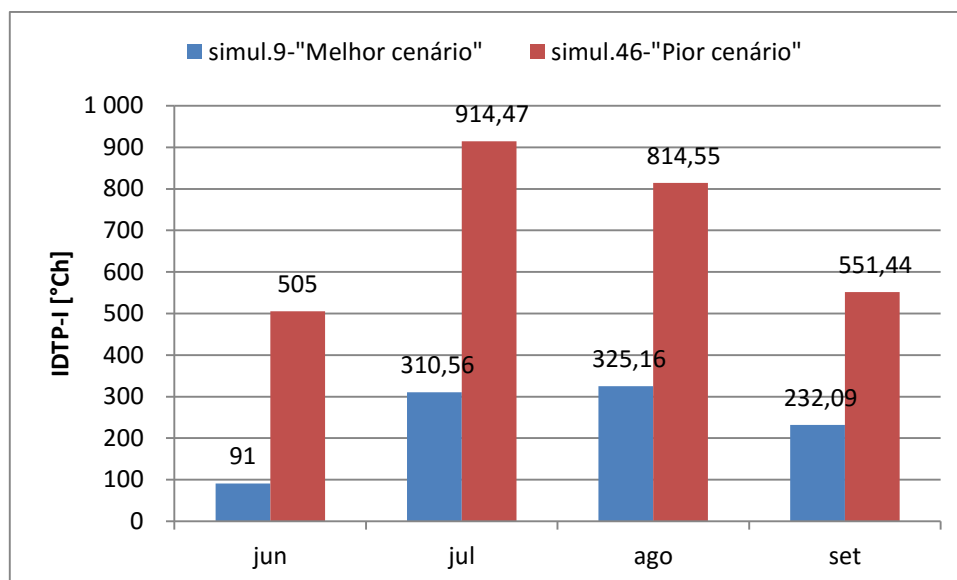


Fig. 143 - Indicador de desconforto térmico de inverno (IDTP-I) para São Paulo

Tabela 60 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para São Paulo

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-I – [°C.h]	959	2.786	1.827

Da análise dos resultados da Fig. 143 e da Tabela 60 verifica-se que:

- O cenário “Pior cenário” (sem isolamento térmico de paredes e cobertura) possui o IDTP – I mais elevado, enquanto que, o cenário “Melhor cenário” (com isolamento térmico em paredes e cobertura) é mais que 100% menor para todos os meses da estação de inverno;
- A diferença global entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário” é de 1827°C.h, o que significa que a colocação de isolamento térmico conjuntamente em paredes e coberturas permite obter uma redução substancial para o IDTP-I. Entre os cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário”, (com isolamento e sem isolamento de paredes e cobertura), os meses de julho e agosto apresentam os valores mais elevados para o IDTP-I em toda a estação de inverno.
- O maior registro para o IDTP-I refere-se ao mês de Julho com 914°C.h, para o “pior cenário”, enquanto que, o maior registro é verificado o mês de Agosto com 325°C.h, para o “Melhor cenário”.

7.7.3. IDTP-I PARA CURITIBA

Na Fig. 144 e na Tabela 61 apresentam-se os resultados do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Inverno (IDTP – I), de Curitiba, durante o período de verão, 4 meses (2928 horas).

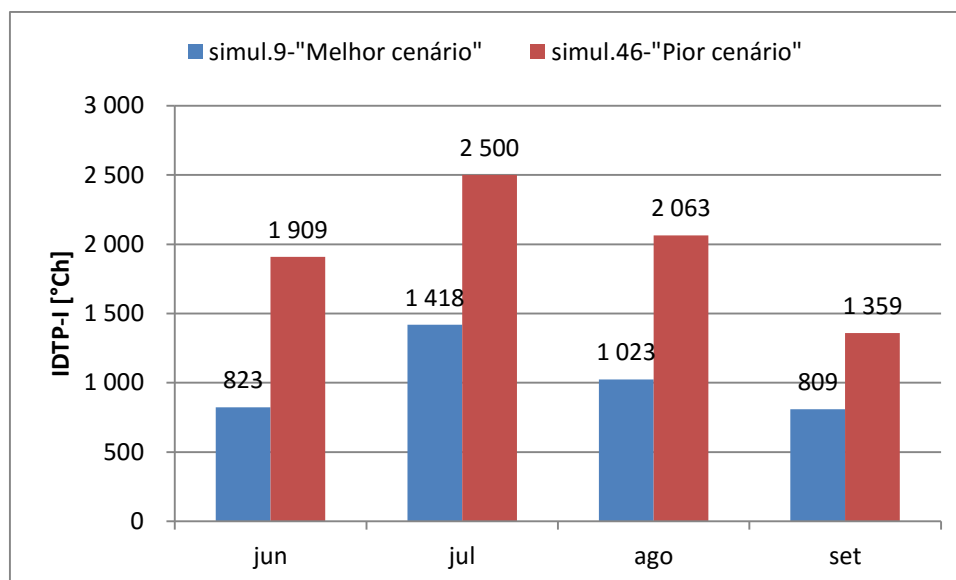


Fig. 144 - Indicador de desconforto térmico de inverno (IDTP-I) para Curitiba

Tabela 61 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para Curitiba.

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-V – [°C.h]	4.073	7.830	3.757

Da análise dos resultados da Fig. 144 e da Tabela 61 verifica-se que:

- O cenário “Melhor cenário” (com isolamento de paredes e cobertura) apresenta resultados inferiores de IDTP-I, quando comparado aos resultados apresentados pelo “Pior cenário” (sem isolamento de paredes e cobertura) nos registros em toda a estação. Para o caso do “Pior cenário” (sem isolamento de cobertura e paredes), é possível destacar uma diferença do IDTP-I com valor maior que 100% no mês de Agosto, quando se compara ao “Melhor cenário”;
- A diferença entre os dois cenários na estação é de 3757 °C.h. O IDTP-I é máximo no mês de Julho com 2500°C.h para o “Pior cenário”, e mínimo para o mês de Setembro, 809°C.h, para o “Melhor cenário”.

7.7.4. IDTP-I PARA RECIFE

Na Tabela 62 são apresentados os resultados nulos do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Inverno (IDTP – I) para Recife, durante o período de verão, 4 meses (2928 horas). Similar ao que acontece em Petrolina, a temperatura média diária na estação de inverno para esta cidade, situa-se na faixa de 24,3°C (ver Tabela 36). Esta temperatura média observada justifica os valores de IDTP-I nulos quando a análise é realizada para uma temperatura de conforto de 20°C.

Tabela 62 - Valores de IDTP-I globais na estação de inverno para Recife

	"Melhor cenário"	"Pior cenário"	Diferença
IDTP-V – [°Ch]	0	0	0

Da análise dos resultados da Tabela 62 é possível verificar que:

- Tanto para a análise do “Pior cenário” (sem isolamento térmico de paredes e cobertura), quanto para o “Melhor cenário” (com isolamento térmico em paredes e cobertura), não há registros de desconforto por frio nesta estação, para este clima.

7.7.5. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL NO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO PASSIVO DE INVERNO – IDTP-I

Realizou-se uma análise comparativa do Indicador de Desconforto Térmico Passivo de Inverno (IDTP – I), para as quatro cidades do território brasileiro consideradas no estudo. Para tal, compararam-se os valores do IDTP – I para a casa de gesso-tipo, Fig. 145 e Tabela 63.

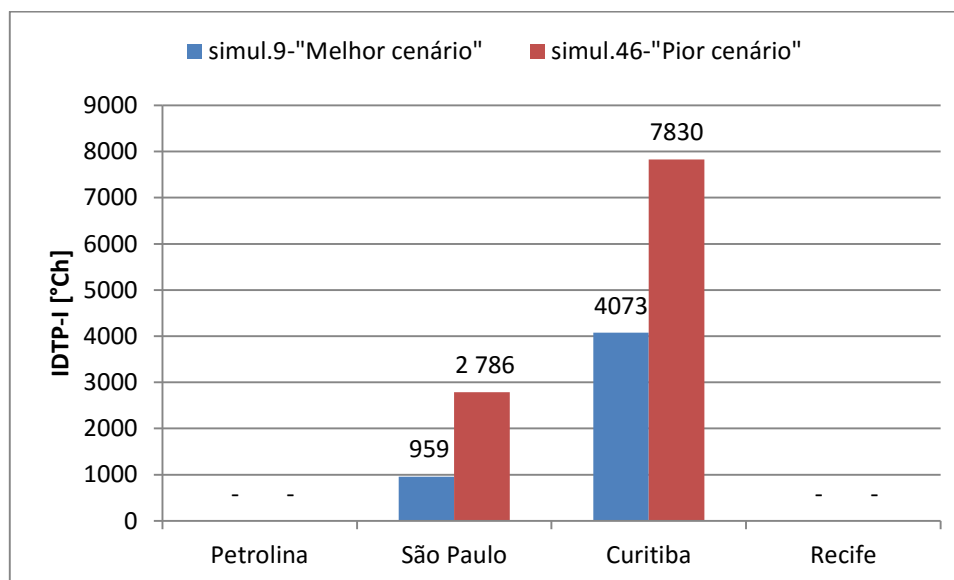


Fig. 145 - Indicador de Desconforto Térmico Passivo de inverno para as quatro cidades estudadas

Tabela 63 - Valores de IDTP-I [°Ch] globais para as quatro cidades em estudo.

Cidades	Simul.9-"Melhor cenário"	Simul.46-"Pior cenário"	Diferença [°Ch]
Petrolina	0	0	0
São Paulo	959	2.786	1.827
Curitiba	4.073	7.830	3.757
Recife	0	0	0

Da análise dos resultados da Fig. 145 e da Tabela 63, é possível verificar que:

- Os cenários “Pior cenário” (sem isolamento de paredes e cobertura) possuem em duas localizações, Curitiba e São Paulo, valores de IDTP – I, 7830 °Ch e 2786 °Ch respectivamente. Quando a análise referencia o cenário “Melhor cenário”, o menor valor do IDTP-I são os registros para São Paulo com 959 °Ch e Curitiba com 4073°Ch;
- A diferença, devido à aplicação de isolamento térmico, entre os cenários é maior em Curitiba, com 3757°Ch, seguida de São Paulo, com 1827°Ch, para as cidades de Petrolina e Recife, o IDTP-I é nulo;
- A aplicação de isolamento térmico em paredes e cobertura da casa de gesso faz com que haja uma diferença de 190% entre os cenários analisados em São Paulo e de 92% quando a análise é feita em Curitiba.

Na Fig. 146 apresenta-se a representação gráfica do IDTP – I para o edifício-tipo durante a estação do inverno.

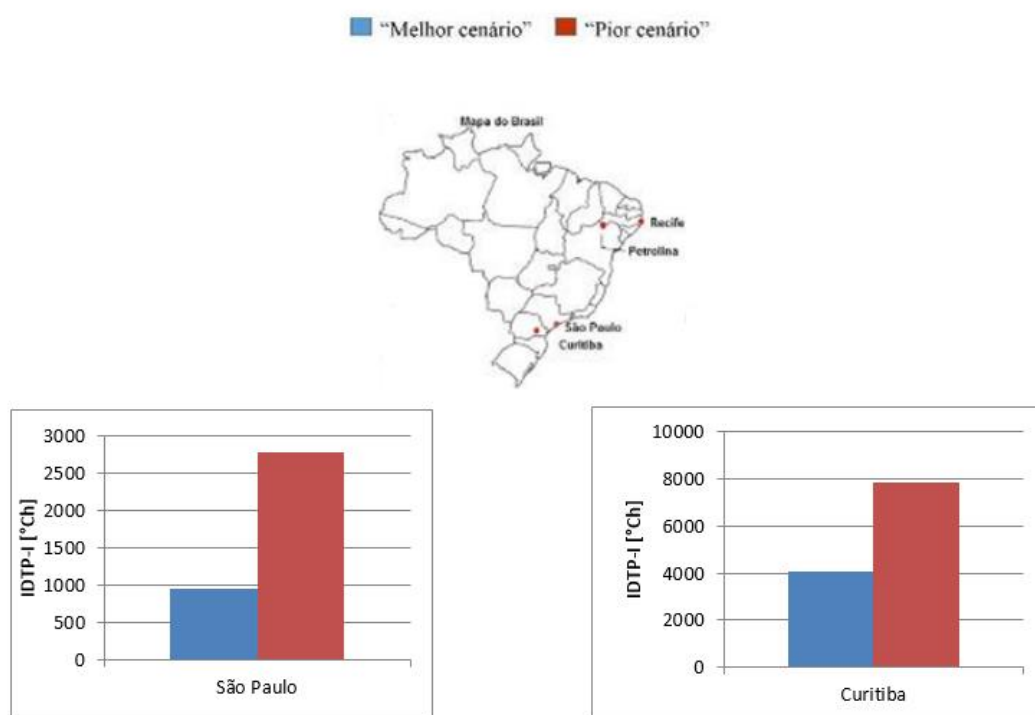


Fig. 146 - Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico Passivo – IDTP-I, para as quatro cidades estudadas.

Dos resultados é possível concluir de uma forma global que:

- Mesmo com o isolamento térmico de paredes e cobertura em Curitiba, o IDTP – I registra 4073 °C.h de desconforto por frio observado para a estação de inverno. A situação se agrava quando se retira o isolamento térmico, piorando o nível de desconforto, chegando essa diferença a mais de 90%;
- O IDTP – I nulo para as cidades de Petrolina e Recife, foi alcançado em regime de livre flutuação da temperatura.

8.

CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DA CASA DE GESSO EM FUNÇÃO DO CLIMA NO BRASIL

8.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Na sequência do estudo de sensibilidade da casa de gesso-tipo desenvolvido no capítulo 7, pretende-se desenvolver um modelo de quantificação do desconforto passivo de verão em classes, visando classificar do ponto de vista do conforto térmico a casa de gesso nas diferentes zonas bioclimáticas do Brasil.

O modelo de quantificação do desconforto térmico passivo de verão pressupõe a adoção da seguinte metodologia:

- Seleção de 54 cenários simulados para as cidades de Petrolina e São Paulo e analisados os valores do indicador de desconforto térmico passivo IDTP 25 °C.h para uma temperatura de 25°C, por um período de um ano;
- Seleção de 10 cenários simulados nas cidades de Curitiba e Recife, representativos dos 54 cenários da grelha maior e cálculo dos respectivos IDTP 25 °C.h para uma temperatura de conforto de 25°C, por um período de um ano;
- Elaboração de uma escala de classes de desconforto passivo tendo em atenção os valores máximos e mínimos obtidos na simulação numérica;
- Analisar para dois cenários considerados (“Melhor cenário” e “Pior cenário”), uma possível alteração de classe de desconforto passivo de verão, quando se passa a considerar um IDTP-V para as temperaturas operativas do conforto adaptativo ASHRAE 55 [80] para cada uma das cidades;
- Avaliar a adequabilidade da casa de gesso aos climas em estudo;
- Finalizar com um conjunto de recomendações sobre a implantação da casa de gesso em diversos climas brasileiros.

8.2. CONDIÇÕES DE CONFORTO PARA VÁRIAS REGIÕES CLIMÁTICAS

Efetua-se um estudo comparativo entre os Indicadores de Desconforto Térmico Passivo de verão (IDTP-V) obtidos com uma temperatura pré-estabelecida para as cidades de Petrolina, São Paulo, Curitiba e Recife e o valor da temperatura operativa definido na escala do valor médio da ASHRAE 55 [80].

Na Fig. 147 quantifica-se a temperatura operativa para as quatro cidades.

Esta temperatura pré-estabelecida de 25°C poderá estar subestimada, como se observa para Recife e Petrolina com temperaturas operativas de conforto de 26,3°C e 26,7°C, respectivamente, ou

superestimada quando observado para as cidade de Curitiba e São Paulo com temperaturas operativas de 23,4 °C e 24 °C, respectivamente.

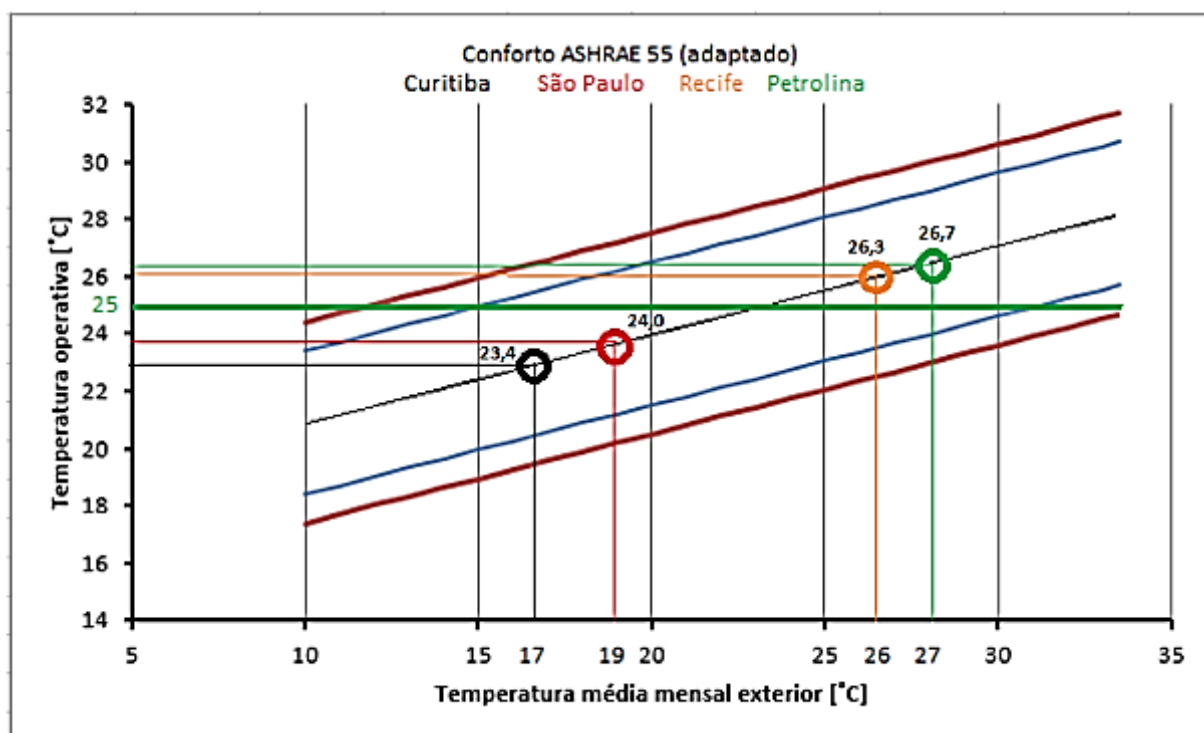


Fig. 147 - Escala de conforto da ASHRAE adaptada

8.3. MODELO DE QUANTIFICAÇÃO DAS CLASSES DE DESCONFORTO PASSIVO DE VERÃO

O modelo desenvolvido para quantificar o desconforto da casa de gesso foi estabelecido em uma escala de 10 classes passivas, determinada com base nos valores máximos e mínimos do IDTP (°C.h) para uma temperatura de 25°C.

Para determinar a escala de classes passivas, adotou-se a seguinte metodologia:

- Selecionou-se o conjunto (global), para 1 ano, de 54 simulações realizadas nesta Tese, no capítulo 7.2.2, em seguida calculou-se com estes cenários, o IDTP (°C.h) global (8760h) para uma temperatura de conforto de 25°C, para as cidades de Petrolina e São Paulo, e 10 cenários para as cidade de Curitiba e Recife;
- Identificou-se um menor valor de IDTP (°Ch) para a cidade de Curitiba e um maior valor de 20000 (°C.h) para a cidade de Petrolina. Estes valores determinaram a amplitude total da amostra para se determinar a escala de classe de desconforto passivo;
- Criou-se uma escala alfabética (A+ a J-) com 10 classes de amplitude de 2000 (°C.h) cada uma;
- Criou-se uma escala qualitativa de 6 classes: excelente (A+), muito bom (B), bom (C), satisfatório (D), satisfatório- (E) e necessidade de climatização (*);
- Estabeleceu-se um conjunto de cores que pudesse associar cada classe com seu respectivo intervalo de valores de IDTP-V (°C.h);
- Procedeu-se a aplicação do modelo criado para avaliação da casa de gesso, através da análise de 54 cenários nas cidades de Petrolina e São Paulo e 10 cenários estabelecidos

como críticos e selecionados no estudo de sensibilidade, para as cidades de Curitiba e Recife.

O modelo desenvolvido que culminou na escala numérica (Tabela 64), foi utilizado como base para estabelecer uma análise do conforto em 4 cidades do Brasil, sendo definidas 10 classes.

Tabela 64 - Escala de classe passiva do IDTP global [°Ch]

Classe Qualitativa	Classe de conforto Passiva - Nível	Escala [°Ch]
Excelente	A+	IDTP 25°C ≤ 2000
Muito bom	B	2001 < IDTP25°C ≤ 4000
Bom	C	4001 < IDTP25°C ≤ 6000
Satisfatório	D	6001 < IDTP25°C ≤ 8000
Satisfatório (-)	E	8001 < IDTP25°C ≤ 10000
*	F	10001 < IDTP25°C ≤ 12000
*	G	12001 < IDTP25°C ≤ 14000
*	H	14001 < IDTP25°C ≤ 16000
*	I	16001 < IDTP25°C ≤ 18000
*	J-	IDTP 25°C > 18000

*Necessidade de climatização

Refira-se que em todos os cálculos do IDTP-V global para 1 ano (8760h), considerou-se uma temperatura de conforto de 25°C

8.4. ADEQUABILIDADE DA CASA DE GESSO AO CLIMA

Na Tabela 65 são apresentados os resultados do IDTP-V para 54 cenários de simulação obtidos no cruzamento da árvore de simulação, Fig. 85 do capítulo 7.2.1, para 2 cidades, Petrolina e São Paulo, onde a casa de gesso foi analisada. Refira-se que se fez variar os parâmetros Uparede, Ucobertura, Ventilação noturna (Rph) e Fator solar de envidraçados ($g^L=FSO$).

Tabela 65 – IDTP-V da casa de gesso para Petrolina e São Paulo para uma temperatura de conforto de 25°C

Cenários de simulação					Petrolina	São Paulo
Nº Cenário	U _{parede} W/(m².°C)	U _{cobertura} W/(m².°C)	Rph(h⁻¹)	g ^L =FSO	IDTP25°C	IDTP25°C
1	1,05	0.51	1.5	0.86	13925	274
2	1,05	0.51	1.5	0.74	13346	227
3	1,05	0.51	1.5	0.26	11059	100
4	1,05	0.51	2	0.86	13641	270
5	1,05	0.51	2	0.74	13068	228
6	1,05	0.51	2	0.26	10815	108
7	1,05	0.51	3	0.86	13174	237

Cenários de simulação (continuação)					Petrolina	São Paulo
Nº Cenário	U_{parede} W/(m ² .°C)	$U_{cobertura}$ W/(m ² .°C)	Rph(h ⁻¹)	$g_{L=FSO}$	IDTP25°C	IDTP25°C
8	1,05	0.51	3	0.74	12615	195
9	1,05	0.51	3	0.26	10419	80
10	1,05	1.03	1.5	0.86	14947	334
11	1,05	1.03	1.5	0.74	14425	288
12	1,05	1.03	1.5	0.26	12361	156
13	1,05	1.03	2	0.86	14638	323
14	1,05	1.03	2	0.74	14120	278
15	1,05	1.03	2	0.26	11931	149
16	1,05	1.03	3	0.86	14130	305
17	1,05	1.03	3	0.74	13625	262
18	1,05	1.03	3	0.26	11624	139
19	1,05	2.08	1.5	0.86	17903	964
20	1,05	2.08	1.5	0.74	17470	898
21	1,05	2.08	1.5	0.26	15761	673
22	1,05	2.08	2	0.86	17659	950
23	1,05	2.08	2	0.74	17228	885
24	1,05	2.08	2	0.26	15529	661
25	1,05	2.08	3	0.86	17253	927
26	1,05	2.08	3	0.74	16826	863
27	1,05	2.08	3	0.26	15146	642
28	1.9	0.51	1.5	0.86	16415	637
29	1.9	0.51	1.5	0.74	15941	574
30	1.9	0.51	1.5	0.26	14055	361
31	1.9	0.51	2	0.86	16232	627
32	1.9	0.51	2	0.74	15764	565
33	1.9	0.51	2	0.26	13900	354
34	1.9	0.51	3	0.86	15933	609
35	1.9	0.51	3	0.74	15475	549
36	1.9	0.51	3	0.26	13643	343
37	1.9	1.03	1.5	0.86	17129	681
38	1.9	1.03	1.5	0.74	16694	622
39	1.9	1.03	1.5	0.26	14967	419
40	1.9	1.03	2	0.86	16925	671
41	1.9	1.03	2	0.74	16494	613
42	1.9	1.03	2	0.26	14783	412
43	1.9	1.03	3	0.86	16589	655
44	1.9	1.03	3	0.74	16166	598
45	1.9	1.03	3	0.26	14479	401
46	1.9	2.08	1.5	0.86	20105	1356
47	1.9	2.08	1.5	0.74	19743	1284

Cenários de simulação (continuação)					Petrolina	São Paulo
Nº Cenário	U_{parede} W/(m ² .°C)	$U_{\text{cobertura}}$ W/(m ² .°C)	Rph(h ⁻¹)	$g_{\text{L}}=\text{FSO}$	IDTP25°C	IDTP25°C
48	1.9	2.08	1.5	0.26	17781	1021
49	1.9	2.08	2	0.86	19947	1347
50	1.9	2.08	2	0.74	19585	1274
51	1.9	2.08	2	0.26	17632	1013
52	1.9	2.08	3	0.86	19678	1331
53	1.9	2.08	3	0.74	18844	1259
54	1.9	2.08	3	0.26	17383	1000

Verifica-se numa análise dos resultados apresentados na Tabela 66 que a casa de gesso na cidade Petrolina, difere dos valores que se verifica para São Paulo, em que todos os cenários simulados apontam a casa para uma situação de desempenho (A+)- nível excelente. No caso de Petrolina, há inúmeros cenários em que o conforto só é obtido com auxílio de meios de climatização.

A Tabela 66 apresenta os resultados de simulação 10 cenários críticos, constantes da grelha geral de 54 casos, adotados no estudo de sensibilidade no capítulo 7, para as cidades de Curitiba e Recife.

Tabela 66 – IDTP-V da casa de gesso para Curitiba e Recife para uma temperatura de conforto de 25°C

Cenário	Curitiba	Recife
	IDTP 25°C	IDTP 25°C
Simul. 3 - Paredes e cobertura isolada;1.5 Rph;FSO=0,26	0	7405
Simul. 6 - Paredes e cobertura isolada;2.0 Rph;FSO=0,26	0	7170
Simul. 9 - Paredes e cobertura isolada-3.0 Rph;FSO=0,26	0	6751
Simul. 18 - Paredes isolada, cobertura meio isolada;3.0 Rph;FSO=0,26	0	7459
Simul. 15 - Paredes isolada, cobertura meio isolada;2.0 Rph;FSO=0,26	0	7903
Simul. 46 - Paredes sem isolamento, cobertura sem isolamento;1.5 Rph;FSO=0,86	186	11316
Simul. 47 - Paredes sem isolamento, cobertura sem isolamento;1.5 Rph;FSO=0,74	173	10954
Simul. 49 - Paredes sem isolamento, cobertura sem isolamento;2.0 Rph;FSO=0,86	173	11102
Simul. 50 - Paredes sem isolamento, cobertura sem isolamento;2.0 Rph;FSO=0,74	161	10746
Simul. 52 - Paredes sem isolamento, cobertura sem isolamento;3.0 Rph;FSO=0,86	154	10724

Da análise na Tabela 65 e Tabela 66, é possível concluir que:

- Ao avaliar o desempenho térmico nas cidades de São Paulo e Curitiba no estudo de sensibilidade desenvolvido no capítulo 7, chegou-se a conclusão que a casa de gesso quando implantada nestes climas, apresenta um IDTP-V não muito elevado. Nas duas cidades a classe de conforto passivo de verão é A+ (excelente), de acordo com a classificação na Tabela 64;
- Para o clima de Petrolina, em apenas 5 cenários a casa de gesso fica inclusa na classe de desconforto passivo de verão “F”, os demais casos encontram-se inseridos entre as classes “G” e até “J-“, o que é motivo de preocupação quanto à adequabilidade da casa neste clima, de acordo com a classificação na Tabela 64;

- Numa análise do enquadramento da casa de gesso para o clima na cidade de Recife, verifica-se que em 50% dos casos, a casa de gesso encontra-se inserida na classe “D”, condição de nível “satisfatório”, e os outros 50%, na classe “F” (com necessidades de climatização), de acordo com a classificação na Tabela 64;
- Os cenários de simulação 3,6 e 9, enquadrados no nível “F” (com necessidades de climatização), em Petrolina, possuem IDTP-V 25°C com valores muito próximos dos valores extremos superiores da classe de nível “E”. Uma verificação para outros valores do IDTP, podem melhorar o nível de conforto passivo neste clima.

Na Tabela 67, é apresentado uma análise para dois cenários considerados no estudo de sensibilidade como “Melhor cenário” e “Pior cenário” para as temperaturas operativas de conforto da ASHRAE 55 nas cidades de Petrolina, São Paulo, Curitiba e Recife, explicitados na Fig. 147, desta vez considerando um IDTP com base na temperatura operativa de conforto para cada cidade.

Tabela 67 - Análise de classe de desconforto passivo em função da temperatura operativa em cada cidade

Cenário	Temperatura Operativa de conforto ASHRAE 55			
	Petrolina	São Paulo	Curitiba	Recife
	IDTP 26,7°C	IDTP 24°C	IDTP 23,1°C	IDTP 26,3°C
Simul. 9 - Paredes e cobertura isolada; 3.0 Rph; FSo=0,26- "Melhor cenário"	1649	417	71	418
Simul. 46 - Paredes sem isolamento, cobertura sem isolamento; 1.5 Rph; FSo=0,86- "Pior Cenário"	9276	2593	1053	2824

Da análise da Tabela 67 é possível concluir que:

- Nas cidades de São Paulo e Curitiba, a casa de gesso já apresentava no estudo de sensibilidade uma situação de boa adequabilidade a estes climas, vindo a permanecer nesta mesma situação quando a análise é feita pelo modelo desenvolvido com base na temperatura operativa de conforto para as cidades, na classe (A+), nível excelente;
- Numa análise, considerando o IDTP para os valores da temperatura operativa de conforto, a cidade de Curitiba mantém-se na classe A+ (nível excelente), para os dois cenários visto, “Melhor cenário” e “Pior cenário”;
- Para Petrolina, a análise do IDTP com base na temperatura operativa de conforto da ASHRAE 55 de 26,7°C, faz a casa de gesso no “Melhor cenário” sair de uma classe de desconforto passivo “F” (necessidade de climatização) para a classe “A+” (excelente), enquanto que, o cenário “Pior cenário”, sai da classe “J-“ para a classe “E”;
- Para Recife, uma análise feita para o IDTP 26,3°C, faz a situação da casa de gesso no “Melhor cenário”, sair de um nível “D” (satisfatório) para a classe “A+” (excelente), enquanto que o cenário “Pior cenário” sai da classe “F” (necessidade de climatização) para a classe “C” de nível “Bom”.

Em suma, uma temperatura de conforto fixa como a que foi adotada de 25°C, não deve ser considerada como um indicador de conforto para todos os climas no Brasil.

8.5. RECOMENDAÇÕES SOBRE A IMPLANTAÇÃO DE CASAS DE GESSO NO BRASIL

Elaborar um conjunto de recomendações sobre a adaptabilidade das casas de gesso para os diversos climas no Brasil, foi um dos objetivos fundamentais no desenvolvimento da Tese.

Do ponto de vista da implantação do sistema construtivo em gesso nos diversos climas brasileiros, faz sentido enumerar algumas informações consideradas importantes e obtidas através do estudo desenvolvido:

- Apresenta vantagens do ponto de vista da oferta de matéria-prima para confecção dos componentes da casa de gesso. O Brasil possui grandes reservas;
- A casa de gesso é viável do ponto de vista de habitabilidade e do conforto térmico em certos climas;
- O estudo serviu para definir dois cenários “Melhor cenário” e “Pior cenário”, e afirmar a necessidade de isolar as coberturas para os vários climas do Brasil. Este tipo de intervenção passiva é capaz de proporcionar poupanças energéticas substanciais;
- A ventilação noturna analisada em três níveis, (1,5Rph; 2,0Rph e 3 Rph), mostrou que para as cidades de Petrolina e São Paulo, o aumento da ventilação não implica em melhoras substanciais no conforto;
- A utilização de vidros refletivos com baixo fator solar, para todos os cenários analisados, demonstra melhores resultados;

8.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Foi desenvolvido um modelo de classificação de desconforto passivo que permitiu classificar o desempenho da casa de gesso em 4 cidades brasileiras. No estudo foi possível avaliar o valor de IDTP para um ano, tendo por base para uma temperatura de 25°C e do IDTP para as temperaturas operativas de conforto de cada cidade.

Num primeiro momento o IDTP foi calculado para uma temperatura de 25°C, o que constituiu a base inicial da análise.

Num segundo momento, analisou-se o desconforto com o IDTP tendo como base a temperatura operativa do modelo adaptativo da ASHRAE 55.

9. CONCLUSÕES

9.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

A busca por edifícios que proporcione conforto térmico e ao mesmo tempo sejam eficientes energeticamente, tem sido um dos grandes motivos de preocupação da comunidade acadêmica e da sociedade como um todo.

Foi apresentado neste documento, a casa de gesso como uma forma de construção econômica, rápida e adaptável às exigências do clima brasileiro.

Durante a realização e finalização da Tese, foi possível estudar o conforto térmico e a eficiência energética de uma moradia unifamiliar, em condições de serviço, construída em blocos de gesso, tendo como base um conjunto de parâmetros medidos para avaliar o desempenho higrotérmico da casa.

A partir do procedimento que caracterizou experimentalmente a casa de gesso, validou-se um modelo de simulação numérico, desenvolveram-se estudos de sensibilidade para um conjunto de cenários obtidos a partir da utilização do programa de cálculo avançado WUFIPlus em 4 cidades do território brasileiro. Avaliou-se o desempenho térmico da casa através de um estudo de influências de 4 parâmetros determinantes ($U_{paredes}$, $U_{cobertura}$, fator solar de envidraçados e ventilação noturna) e calculou-se o desconforto através de dois Indicadores de Desconforto Térmico Passivo (IDTP-I e IDTP-V) para o inverno e o verão, incluindo uma representação gráfica no mapa do Brasil. Visando ratificar o estudo de sensibilidade, criou-se um modelo capaz de avaliar quantitativamente e qualitativamente a casa de gesso em 4 climas no Brasil e verificar a adequabilidade ou não para diferentes climas. Por fim, é emitido neste documento um conjunto de recomendações que facultam a introdução da casa de gesso no contexto da realidade brasileira.

Em seguida, são apresentados alguns aspectos relevantes obtidos nesta Tese, e que foram fundamentais explorá-los para eficácia do estudo:

- Caracterizou-se a questão da problemática habitacional brasileira de um modo quantitativo e qualitativo. Chegou-se à conclusão que é necessário construir entre 2007 e 2023, para resolver o *déficit* habitacional, 35 milhões de habitações no Brasil;
- Foi apresentado em um estudo geral das 8 zonas bioclimáticas do Brasil. Desenvolveu-se um estudo de implantação da casa de gesso em 4 zonas bioclimáticas, a saber, 1;3;7 e 8. Estudar os dados climáticos da cidade de Petrolina na zona bioclimática 7, foi um condicionante na elaboração da tese;
- Avaliou-se a importância da produção em consumo de gesso no Brasil e Pernambuco. Apresentaram-se estudos sobre o consumo “*per capita*” que colocam o Brasil em 9º lugar, com consumo com 13 kg/habitante.ano, enquanto que entre os maiores consumidores mundiais de gesso, Canadá e Espanha o consumo chega a 315 kg/habitante.ano e 180

kg/habitante.ano, respectivamente. O Brasil situa-se em termos de consumo, 24 vezes menor que o maior consumidor mundial, o Canadá;

- Criou-se um modelo numérico a ser implantado no software WUFIPlus para em seguida avançar nas simulações;
- Identificou-se que o modelo adaptativo da ASHRAE 55, dos modelos apreciados, foi o mais apropriado ao estudo do conforto térmico na casa de gesso-tipo;
- Desenvolveu-se um conjunto de simulações, em seguida validou-se o software WUFIPlus. Posteriormente, elaborou-se um estudo de sensibilidade.

As conclusões de maior significado que foram retiradas desta tese passam a ser expostas:

- A ventilação noturna estudada em três níveis, 1,5 Rph, 2.0Rph e 3.0Rph, mostrou não ser um meio passivo eficaz para arrefecer a temperatura interior, os benefícios obtidos chegam em média a 0,5°C nas temperaturas máximas observadas nas 4 cidades entre os cenários com isolamento e sem isolamento;
- As temperaturas médias do ar, na estação de verão, para as 4 cidades estudadas, apresentaram-se com valores próximos dos 25°C;
- Testou-se no âmbito de investigação no Laboratório de Física das construções da FEUP o uso de um equipamento de transmissão de dados climáticos à distância.
- O estudo de sensibilidade desenvolvido na tese permitiu que fossem apresentadas as seguintes conclusões:
 - a) O tempo de desconforto analisado nas 4 cidades, no verão, demonstra que para Petrolina esse valor atinge 86% contra 77% em Recife, não apresenta desconforto em São Paulo com 3% do tempo e se anula para Curitiba, para uma situação em que as paredes e cobertura estão isoladas;
 - b) As temperaturas interiores médias simuladas nas quatro cidades, estão abaixo da temperatura de conforto de referência de 25°C em São Paulo e Curitiba entre 3°C e 4°C. Para Petrolina e Recife, os registros indicam de 0,5°C a 1°C acima da mesma temperatura de referência;
 - c) O consumo energético no verão para as 4 cidades variam de 11 kWh/m² para 21 kWh/m² em Petrolina, 8 kWh/m² para 19 kWh/m² em Recife e mostra uma diferença de 4 kWh/m² e 2 kWh/m² em São Paulo e Curitiba, respectivamente, para coberturas com isolamento e sem isolamento;
 - d) O consumo energético na estação do verão é maior entre 6;10;3 e 2,5 vezes que o inverno, nas cidades de São Paulo, Curitiba, Recife e Petrolina, respectivamente;
 - e) É possível ter conforto sem arrefecer o ar ambiente no verão em Curitiba e São Paulo, os consumos são inferiores a 3 kWh/m² e 6 kWh/m², respectivamente, para uma análise do “Pior cenário”.
- Foram desenvolvidos dois indicadores de desconforto térmico passivo para o inverno e o verão, o IDTP-I e o IDTP-V, esses indicadores estão baseados na análise da temperatura de conforto de 25°C para o verão e 20 °C para o inverno;
- Foi desenvolvido um modelo de análise do desconforto através de duas análises, uma qualitativa e outra quantitativa, com uma classe de desconforto térmico passivo de amplitude total de 16.000 graus-hora e por classe de 2.000 graus-hora. O modelo levou em consideração uma temperatura de conforto de 25°C, e posteriormente foi analisado para a temperatura operativa de conforto para cada cidade através do diagrama de conforto adaptativo da ASHRAE 55 [80];

- A casa de gesso mostra com base no estudo desenvolvido nesta Tese, constituir uma modalidade construtiva com excelentes possibilidades de vir a se tornar uma alternativa na resolução do problema do déficit habitacional brasileiro, é adequada pelo estudo desenvolvido, a 50% do clima do país;
- A questão da incidência de água nas paredes de gesso constitui um item não abordado neste documento, no entanto, é possível observar estudos relativos em uma Tese do LFC, no ano de 2016, nomeadamente sobre o comportamento higrotérmico de paredes de gesso.

Este capítulo terá como objetivo principal, transpor a investigação e os resultados obtidos na experimentação prática para um conjunto de recomendações construtivas, extensivo às diversas zonas climáticas brasileiras, concebendo soluções otimizadas visando fornecer subsídios ao estudo do conforto e eficiência energética para edificações construídas em gesso.

9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O contributo do estudo desenvolvido nesta tese de doutoramento permitiu que se pudesse chegar a um conjunto significativo de conhecimentos científicos e oportunizar uma gama de trabalhos futuros no domínio do conforto térmico e eficiência energética em casas de gesso. Destaca-se alguns temas que se considera importante vir a desenvolver:

- O estudo desenvolvido nesta tese, centrou as monitorizações de dados higrotérmicos em Petrolina, região nordeste do Brasil. Neste contexto, sugere-se o desenvolvimento dessa prática em outros locais visando estudar o desempenho higrotérmico da modalidade construtiva em gesso para outros climas;
- O estudo do consumo energético na tese foi centrado nos resultados obtidos nas simulações efetuadas. Sendo assim, justifica-se um estudo comparativo de quantificação do consumo de energia real e numérico dos sistemas construtivos em gesso;
- O estudo do conforto térmico e da eficiência energética ficou centrado na temperatura do ar interior. No entanto, tendo sido medido outro parâmetro higrotérmico, a umidade relativa do ar, sugere-se que seja desenvolvido trabalhos de investigação em que se possa ter esse parâmetro higrotérmico como balizador do desempenho de casas de gesso;
- Na tese centrou-se o estudo numa geometria simples de moradia direcionada à classe média brasileira. Sugere-se que futuros trabalhos que se venha a desenvolver no âmbito do domínio da higrotérmica, possa contemplar outras geometrias e outros padrões;
- A Ventilação noturna nesta tese, ficou centrado em três níveis de ventilação para elaborar um estudo de sensibilidade com base nesse parâmetro higrotérmico. O aprofundamento de outros estudos de casos levando em consideração diferentes níveis, poderá conduzir a um valor-limite desse parâmetro e determinar uma condição fronteira entre conforto e desconforto térmico;
- Na tese foram desenvolvidos dois indicadores de desempenho, o IDTP-I e o IDTP-V, para o inverno e o verão, que avaliou o desconforto térmico na casa de gesso-protótipo, com base em uma temperatura máxima de conforto de 20 °C e 25°C. Em trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de estudos para outras temperaturas;
- Desenvolveu-se na tese um modelo de adequabilidade das casas de gesso aos climas brasileiros estudados, com base em um IDTP de 25°C. Prosseguiu-se no estudo levando-se em consideração a temperatura operativa de conforto do modelo adaptativo da ASHRAE 55 para 4 cidades do Brasil. Sugere-se o aprofundamento desse estudo no domínio da higrotérmica, de modo que sejam aplicados outros modelos de predição de conforto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Maricato, Ermínia. *Brasil, cidades: alternativas para a crise urbana*. Petrópolis: Vozes, 2001;
- [2] Fundação João Pinheiro. Centro de Estatística e Informações. *Déficit habitacional no Brasil, municípios selecionados e microrregiões geográficas*. Convênio PNUD/Ministério das Cidades, Belo Horizonte, 2005;
- [3] Ministério Das Cidades/ SNH. Política Nacional de Habitação. Caderno MCidades 4, Brasília, 2006;
- [4] http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default_resultados_amostra.shtm. Censo Demográfico 2010 acesso em 01/11/2013;
- [5] Garcia, F. e Castelo, A. M. O déficit habitacional cresce apesar da ampliação do crédito. *Conjuntura da Construção*, ano 4 (mar.), n. 1, pp. 8-11, março de 2006;
- [6] Fundação João Pinheiro. Centro de Estatística e Informações. *Déficit habitacional no Brasil 2000*. Convênio PNUD/Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano (Presidência da República), Belo Horizonte, 2001;
- [7] IBGE., *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio - 2005 microdados*. Rio de Janeiro, CD-ROM, 2006;
- [8] Cedeplar/UFGM - Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional. Estudo para o Ministério das Cidades *Projeto - projeção da demanda demográfica habitacional, o déficit habitacional e assentamentos subnormais*”, 2007;
- [9] E&Y. *Brasil sustentável. Potencialidades do mercado habitacional*. São Paulo: Ernst & Young, 2008;
- [10] Denaldi, R. Estado, políticas habitacionais e favelas no Brasil. *Revista Leopoldianum*. Santos – SP, 2004;
- [11] LEI nº 11.977, de 7 de julho de 2009. Planalto, 2014. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/11977.htm>. Acesso em: 09 jan, 2014.
- [12] Carrières, Kelen Regina Monte. Desempenho Térmico e Consumo Energético de Edifícios de Escritórios em São Carlos. 2007. 152 f. Dissertação (Mestre) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- [13] Huberman, N.; Pearlmutter, D. A life – cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, n. 40, p. 837 – 848, 2008;
- [14] Kuznik, F. *et al.* A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, doi:10.1016/j.rser.2010.08.019.
- [15] Achão, C. C. L. Análise da Estrutura de Consumo de Energia pelo Setor Residencial Brasileiro [Rio de Janeiro]. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2003 103p;
- [16] BRASIL - Presidência da República. Casa Civil. Subchefia de assuntos jurídicos. Decreto nº 4.059 de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. In: *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 2001.
- [17] BEN-Balanco Energético Nacional 2010: Ano base 2009 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2010.

- [18] Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2008.
- [19] BEN-Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2013.
- [20] BEN-Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2014 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2015.
- [21] Sumário Mineral, DNPM/PE Brasília (2006).
- [22] SINDUSGESSO. Pólo gesseiro. 2009 Disponível em <<http://www.sindusgesso.org.br/>>. Acesso em: 02 abril. 2012;
- [23] Lyra Sobrinho, A. C. P.; Amaral, A. J. R. e Dantas, J. O. C., Gipsita. Sumário Mineral DNPM, p. 175-178, 2006;
- [24] Luz, Adão Benvindo da & Lins, Fernando Freitas. *Rochas & Minerais Industriais* – CETEM – MCT – Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2005;
- [25] Mancino, N. Gypsum in the Middle East; from antiquity to modern day. Global Gypsum Magazine, maio 2008;
- [26] Pires Sobrinho, C.W. A; Bezerra, N.M.; Costa, T.C.C; Silva, C.B.A- Vedações Verticais em Alvenaria de Blocos de Gesso para Estruturas Aporticadas de Concreto Armado-Projeto, Execução e Desempenho. 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, 2010;
- [27] Santos, Almai do Nascimento dos, *Comportamento Higrotérmico de Paredes em Gesso-Adequabilidade a Zonas Climáticas do Brasil*, Plano de Tese Submetido Para Satisfação Parcial dos Requisitos do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da universidade do porto, 2014;
- [28] Abeysundara, .G.Y.; Bael, Sgheewala, S.A. matrix in life cycle perspective for selecting sustainable materials for buildings in Sri Lanka. Building and Environment, vol. 44, Ed. Elsevier, 2008;
- [29] Tavares, S.F., Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC. Florianópolis, 2006;
- [30] Nohier, M. Construire en plâtre. Paris: L'Harmattan, 1986;
- [31] Asociación Técnica Y Empresarial del Yeso Ejecución de revestimientos con yeso. 2008 Disponível em: <http://www.atedy.es/buscarPub.asp>>. Acesso em: 17 dez. 2012;
- [32] Pires Sobrinho, C. W. A. Vedações Verticais em Alvenaria de Blocos de Gesso para Estruturas Aporticadas de Concreto Armado-Projeto, Execução e Desempenho. Documento Técnico. Recife, 2009;
- [33] Lordsleem Jr., A.C. Método construtivo de Vedação Vertical Interna com Blocos de Gesso. Projeto de pesquisa. FACEPE, Recife, 2009;
- [34] Les Industries du Plâtre. Les atouts du plâtre. Disponível em <http://www.lesindustriesduplatre.org/docs/atouts.pdf>>. Acesso em 10 abr 2013;
- [35] BrazilianGypsum, (www.braziliangypsum.com/noticias), 2008 ,acesso 07/12/2013;
- [36] UNE EN 12859:2008 - Gypsum blocks - Definitions, requirements and test methods;
- [37] UNE EN 12860:2001 - Gypsum based adhesives for gypsum blocks - Definitions, requirements and test methods;

- [38] UNE EN 15318:2007 - Design and application of gypsum blocks;
- [39] UNE EN 13279 - 1: 2008 - Gypsum binders and gypsum plasters;
- [40] Association Française de Normalisation. NF P 72 – 202: *Ouvrages verticaux de plâtrerie NE nécessitant pas l'application d'un enduit au plâtre – Exécution des cloisons en carreaux de plâtre*. Paris, 1994;
- [41] Ministério da Indústria e Comércio Exterior. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência energética de Edificações Residenciais, RTQ-R. Eletrobrás, 2010;
- [42] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações - Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro. 2005;
- [43] Koenigsberger, O.; Ingersol, T.G., Maythrew, A.; Szokolay, S. V. Manual of tropical housing and building. Part I: Climatic Design. London: Longman, 1974;
- [44] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15575-4, “Edificações habitacionais — Desempenho”. Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas; Rio de Janeiro. 2013;
- [45] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15575-5, “Edificações habitacionais — Desempenho”. Requisitos para os sistemas de coberturas Rio de Janeiro. 2013;
- [46] Peeters, L.; Dear, R.; Hensen, J.; D’haeseleer, W. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Applied Energy*, v. 86, 2009;
- [47] Matias, L., Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal. Coleção Teses e Programas de Investigação LNEC, TPI 65. ISBN 978-972-49-2207-2. Lisboa: LNEC, 2010;
- [48] Nicol, J. F.; Humphreys, M.A. *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. In: *Moving Thermal Comfort Standards into the 21 Century*, 2001, Windsor, UK. Proceedings. Oxford: Oxford Brookes University, April, 2001;
- [49] De Dear, R.J. The adaptive model of thermal comfort: Macquarie University’s ASHRAE RP-884 Project. 2004;
- [50] Houghten, F.C.; Yaglou, C.P. Determining lines to equal comfort, and determination of the comfort zone. In: *ASHRAE Transactions*, v.29, 1923;
- [51] Fanger, Povl Ole; Toftum, J., *Extension of the PMV Model to Non – Air Conditioned Buildings in Warm Climates*, Energy and Buildings, 2006;
- [52] Olesen, B.W.; Parsons, K.C. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v.34, n.6, p. 537-548, 2002;
- [53] Araújo, V. M. D. Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996;
- [54] Hackenberg, A. M., Conforto e “Stress” Térmico em indústrias: pesquisas efetuadas nas regiões de Joinville, SC e Campinas, SP. 270 f. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, SP, 2000;

- [55] Gouvêa, T. C. Avaliação do conforto térmico: uma experiência na indústria da confecção. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Construção Civil, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2004;
- [56] Gemelli, C. S. B. Avaliação de conforto térmico, acústico e lumínico de edificação escolar com estratégias sustentáveis e bioclimáticas: o caso da Escola Municipal de Ensino Fundamental Frei Pacífico. 2009. 17 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009;
- [57] Andreasi, A. A. Método para avaliação do conforto térmico em região de clima quente e úmido no Brasil. 204 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009;
- [58] Lamberts, R.; Xavier, A. A. P. Conforto térmico e stress térmico. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis. SC, 2011;
- [59] Gagliano, A., Nocera, F., Patania, F. & Capizzi, G. A Case Study of Energy Retrofit in Social Housing Units. In: *Proceedings of The Mediterranean Green Energy Forum 2013, MGEF-13*, Fes, Morocco, 16-20 June 2013.
- [60] *Tratado da Arquitetura*, Vitruvius;
- [61] International Organization for Standardization. ISO 7730, Ambiance thermique modérée – Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique, International Standardisation Organisation, Geneva, Suisse, 2005;
- [62] Jerónimo, Rui Miguel Sendas, *Avaliação do desempenho Higrotérmico e do Conforto de Edifícios Rurais Reabilitados*, Plano de Tese Submetido Para Satisfação Parcial dos Requisitos do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012;
- [63] Ashrae Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy; Atlanta: American Society Of Heating, Refrigerating And Airconditioning Engineers, Inc., 2010.
- [64] EN 15251 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN, Brussels, Belgium, 2007.
- [65] Nicol, F. & McCartney, K., Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs) Project. Final Report. Joule III Project (Contract JOE3-CT97-0066), 2000.
- [66] MCCARTNEY, K. & NICOL, F., 2002. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 34 (6), pp 623-635.
- [67] CIBSE – The Chartered Institution of Building Services Engineers, 2006. Guide A: Environmental Design. Norwich, England: 2006.
- [68] Brager G. e de Dear R., Thermal adaptation in the built environment: a literature review, *Energy and Buildings* 27, 83-96, 1998;
- [69] De Dear R., Brager G. e Cooper D., Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, ASHRAE RP-884 – Final Report, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 1997;
- [70] Curado, António José Candeias, *Conforto Térmico e Eficiência Energética nos Edifícios de Habitação Social Reabilitados*, Tese Submetida Para a Satisfação dos Requisitos de Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014;

- [71] Gratia, E.; Bruyère, I.; De Herde, A. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. *Building and Environment* n.39 p.1157 – 1170, 2004;
- [72] Schiffer, S. R.; Frota, A. B., *Manual de Conforto Térmico*, 7.ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003;
- [73] Mazon, Ana Amélia Oliveira; Silva, Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva; Souza, Henor Artur. Ventilação natural em galpões: o uso de lanternins nas coberturas. *Revista Escola de Minas*. vol.59 n°.2. Ouro Preto – MG. Apr./June 2006;
- [74] Hunzinker, Daniel Vianna. Estudo dos fenômenos da ventilação natural em edificações. *IX Congresso Interno de Iniciação Científica da Unicamp*. Campinas - SP, 2001;
- [75] Gandemer, J; Barnaud, G. Ventilation naturelle des habitations sous climat tropical humide: approach aerodynamique. Report for the CSTB, Nantes, 1989;
- [76] Huet, O.; Celaire, R. Bioclimatisme en zone tropicale: construire avec le climate. Groupe de Recherche et d'Échanges Technologiques- GRET. Paris: Ministère de la Coopération. Programme Interministeriel Rexcoop, 1986;
- [77] Andreasi, W. A. A Ventilação natural como estratégia visando proporcionar conforto térmico e eficiência energética no ambiente interno. UFMS, 2007;
- [78] Nicol, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, vol 36, 2004.
- [79] Givoni, B., *Effectiveness of Mass and Night Ventilation in Lowering the Indoor Daytime Temperatures. Part I: Experimental Periods*, Escola de Artes e de Arquitetura, Los Angeles, Estados Unidos América, 1997;
- [80] Artmann, N., Heinrich, M., Heiselberg, P., *Potential for Passive Cooling of Buildings by Night – Time Ventilation in Present and Future Climates in Europe*, 23rd International PLEA Conference, Genebra, Suíça, 2006;
- [81] Shaviv E., Yezioro A., Capeluto, I. G., *Thermal Mass and Night Ventilation as Passive Cooling Design Strategy*, Instituto da Tecnologia de Israel, Faculdade de Arquitetura e planejamento de Haifa, Haifa, Israel, 2001;
- [82] Santamouris, M., *Energy in the Urban Built Environment: The Role of Natural Ventilation*, Natural Ventilation in the Urban Environment: Assessment and Design, Editors Francis Allard and Cristian Ghiaus, Reino Unido, 2005;
- [83] Santamouris, M, Sfakianaki, A., Pavlou, K., *On the Efficiency of night Ventilation, Techniques Applied to Residential Buildings*, Grupo de Estudos do Ambiente de Edifícios, Departamento de Física Aplicada, Universidade de Atenas, Atenas, Grécia, 2010;
- [84] Delgado, J. M. P. Q., Ramos, N. M. M., Barreira, E., Freitas V. P. de. A Critical Review of Hygrothermal Models Used in Porous Building Materials. *Journal of Porous Media*, 13(3), pp. 221-234, 2010;
- [85] Hensen, J. L. M.; Lamberts, R.; Negrao, C. O. R. A view of energy and building performance simulation at the start of the third millennium. Issue 9, v.34, p.853-855. *Energy and Buildings*, 2002;
- [86] Almeida, Ricardo Manuel dos Santos Ferreira, *Avaliação do Desempenho Higrotérmico do Parque Escolar Reabilitado*, Programa de Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009;

- [87] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15220-2: cálculo de atraso térmico de edificações - Parte 2: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro. 2005.
- [88] Frota, Anésia Barros. Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo / Anésia Barros Frota, Sueli Ramos Schiffer. 5. ed. São Paulo : Studio Nobel, 2001;
- [89] Ferreira, Cláudia, Plano de Tese Submetido Para Satisfação Parcial dos Requisitos do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012;
- [90] Augenbroe, Godfried; Malkawi, Ali; *Advanced Building Simulation*, Spon Press, Londres, Reino Unido, 2004;
- [91] Nicol, F, Humphreys, M Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251. *Buildings and Environment* 2010; 45:11-17.
- [92] Turner, S. *ASHRAE's Thermal Comfort Standard in America: Future steps away from energy intensive design*. Proceedings of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge. Windsor, UK. 27-29. July 2008
- [93] Pedrini, A.; Hyde, R. A. A database energy tool for early stages of building design: the LTV Method. PLEA 2001 18th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Florianópolis. Nov. 2001.
- [94] Wilde, P.D; Voorden, M.V.D. Providing computational support for the selection of energy saving building components. *Energy and Building [S.I.]*. V.36.n 8, p. 737-748, 2004.
- [95] Venâncio, R., 2007. A Influência de Decisões Arquitetônicas na Eficiência Energética do Campus/UFRN – Vol. I. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal.
- [96] *Fundamentals of WUFI Plus*, Fraunhofer Intitut für Bauphysic, Alemanha
- [97] Freitas, V. P., Guimarães. A. S., Torres, M. I. *Humidade Ascensional*. FEUP edições, Porto, 2008
- [98] Ramos, N; Delgado, J; Barreira, E; Freitas, V.P. (2009) *Hygrothermal properties applied in numerical simulation: Interstitial condensation analysis*. *Journal of Building Appraisal*, Vol. 5, Issue 2 pp. 161-170. Palgrave Macmillan, Hampshire, UK.
- [99] Kumaran, M. (1996) *Heat, air and moisture transfer through new and retrofitted insulate envelope parts*. Task 3 – Material properties. International Energy Agency (IEA) ANNEX 24 – Final Report. K.U. – Leuven, Belgium.
- [100] Freitas, V.P.; Pinto, P. (1998) *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção – Condensações internas*. NIT 002. LFC, Porto, Portugal.
- [101] Santos, A.P.; Matias, L. (2007) *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. ITE 50. LNEC, Lisboa, Portugal.
- [102] European Committee For Standardization – CEN (2005) ISO 10456:2007 *Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*. CEN, Brussels, Belgium.
- [103] Delbin, Simone. (2007) *Inserção de simulação computacional de conforto ambiental de edifícios em ensino de projeto arquitetônico: proposta de metodologia* – Campinas, SP.
- [104] <http://www.fraunhofer.de/> , consultado em Julho de 2015.

- [105] Köppen, W.; Geiger, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.
- [106] Lamberts, R.; Triana, M. A. *Relatório Estado da Arte. Capítulo Energia. Projeto Tecnologias para a Construção Habitacional mais Sustentável*, 2007
- [107] Brasil. Ministério da Integração Nacional. *Relatório final do grupo de trabalho interministerial para redelimitação do semiárido nordestino e do polígono das secas*. Brasília,DF:MIN:MMA, 118p.il., 2005
- [108] <http://www.aptinov.com/en/index.html>, acesso em janeiro de 2012
- [109] Freitas, V.P., *Quantificação do Coeficiente Volumétrico das Necessidades de Aquecimento-B em Função das Características da Envolvente, Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica*, FEUP-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1985.
- [110] Roriz, M. *Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações*. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos – SP, 2012. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivosclimaticos/formato-epw>. Acesso em: Janeiro de 2013.